

Tomi Tuominen

TIETOMALLIN HYÖDYNTÄMINEN RAKENNEANALYYSISSÄ

Rakennetun ympäristön tiedekunta
Diplomityö
Lokakuu 2019

TIIVISTELMÄ

Tomi Tuominen: Tietomallin hyödyntäminen rakenneanalyyysissä
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Lokakuu 2019

Tämän diplomityön tarkoituksena on luoda toimiva prosessi tietomallin hyödyntämiselle rakenneanalyyysissä sekä kehittää ohjelmistojen välisen rajapinnan käyttöä. Ongelmaa tutkitaan kohdeyrityksen toimintaympäristön ohjelmilla. Tietomallinnusohjelmistona toimii Autodesk Revit 2019 (Revit) ja laskentaohjelmistona Strusoft FEM-Design 18 (FEM-Design).

Työn alussa selvitetään tietomallinnuksen käyttöä rakennusalaalla sekä perehdytään työssä käytettyihin mallinnus- ja suunnitteluohjelmiin. Tietomallinnuksen ja laskentaohjelman tietosisältöön ja sen vaatimuksiin tutustutaan tarkemmin, jotta voidaan kehittää tiedonsiirrolle prosessi. Prosessin toimivuutta testataan Case-kohteen rakennemallin avulla. Case-kohteella keskitytään rakenneanalyyysin mahdollistamiseen, tiedonsiirron oikeellisuuteen ja rajapinnan toimintaan.

Ohjelmien välisen rajapinnan toiminta vaatii rakennemallin oikeellisen tietosisällön. Tietomallin tiedon hyödyntäminen vaatii käyttäjiltä ymmärrystä mallinnuksen tietosisällöstä ja rakenneanalyyysin vaatimista lähtötiedoista. Kun hallitaan saatavilla olevaa tietoa ja tiedetään tiedon tarve, voidaan määrittää rakennemallista tarpeellinen siirrettävä tieto. Näin voidaan luoda selkeät raamit rajapinnalle ja tiedon sijainnille.

Case-tutkimuksen avulla huomattiin tarve tietosisällön parantamiselle. Tietosisällön parantamisella saatiin Revitin analyyysimalli tarkemmaksi. Tuloksena saatiin kehitettyä lähes kaikille rakennusosille toimiva tiedonsiirron prosessi, jonka avulla tiedonsiirtoa voidaan hallita. Tutkimuksessa havaittiin Revitin edut tietomallin hallintaan ja FEM-Designin edut kuormien ja tukiehtojen luontiin. Prosessin avulla tietosisältö voidaan siirtää hallitusti Revitistä FEM-Designiin. Siirretyn tiedon avulla voidaan suorittaa rakenneanalyyysi.

Tutkimuksen avulla parannetulla tietosisällöllä on valmiudet linkitettyyn rakenneanalyyysiin. Tutkimuksen perusteella käytetyistä ohjelmistoista voidaan saada enemmän hyödynnettävää irti kehitystyöllä, jos sille varataan riittävät resurssit. Rakenneanalyyysien laajentamisella tehostetaan toistuvia suunnittelutehtäviä sekä saadaan enemmän aikaa rakennesuunnittelulle. Lisäksi on syytä seurata parametrin suunnittelun ja algoritmiväestöisen tietomallintamisen hyödyntämisen kehittymistä alalla.

Avainsanat: Tietomalli, rakenneanalyyysi, BIM

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Tomi Tuominen: Utilization of building information model in structural analysis
Master of Science Thesis
Tampere University
Master's Degree programme in Civil Engineering
October 2019

The purpose of this thesis is to create a functional process for utilizing building information model in structural analysis and to develop use of software interface. The problem is studied through programs in the operating environment of target company. The building information modeling software used is Autodesk Revit 2019 (Revit) and the computing software used is Strusoft FEM-Design 18 (FEM-Design).

First, building information modeling in civil engineering and used programs will be studied at a general level. The data content and requirements of the softwares used will be studied in more detail in order to develop data transfer process. The functionality of the process is tested using a case study. The focus of the study is to develop the process so that building information model can be converted into a structural analysis model, the analysis produces reliable results and the software interfaces are working properly.

Software interfaces to structural model require correct data content to function properly. Utilization of structural model requires good understanding of produced data and initial data of structural analysis. By managing the information available and knowing the need for the information, the necessary data to be transferred from the structure model can be determined. Then we can create defined location of the data and boundaries for the interface.

The case study identified the need to improve the data content. Improvements to the data content made the analytical model of Revit more accurate. As a result, process was developed for almost all building components to control data transfer. The study found the benefits of Revit in modeling tasks and the benefits of FEM-Design in creating loads and support conditions. With the process it is possible to transfer data content from Revit to FEM-Design in a controlled fashion. With the transferred data it is possible to perform structural analysis.

The research-enhanced information content has the capability for linked structural analysis. Utilization of used programs can be improved if enough resources are given. Extending computer aided structural analysis enhances repetitive design tasks and gives more time for structural design. Furthermore, there is a motive to follow how parametric modeling and algorithms develop in the field of structural engineering.

Keywords: data model, structural analysis, BIM

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin osana rakennustekniikan diplomi-insinöörintutkintoa Tampereen yliopistossa. Kiitos Insinööritoimisto Jorma Jääskeläinen Oy:lle tämän diplomityön mahdollistamisesta. Kiitokset diplomityön asiantuntevasta ohjaamisesta Jorma Jääskeläiselle ja Pekka Kajavalle, jotka ovat auttaneet selviämään ongelmallisista tilanteista. Tampereen yliopiston Mikko Malaskalle ja Sami Pajuselle kiitokset työn tarkistamisesta ja erityisesti kiitokset vastuuhjaajalle Malaskalle innostavasta ohjaamisesta ja kehitysideoista.

Haluan kiittää kaikkia opiskeluissani tukeneita ystäviä, joiden avulla opinnot on saatu päätökseen. Ilman ajatustenvaihtoa kanssanne ja ilman lukuisia yhteisiä harjoitustyötunteja olisivat opintoni olleet paljon työläämmät ja puuduttavat. Teidän tukenne avulla olen aina päässyt eteenpäin suurienkin haasteiden yli. Kiitos myös kaikille TTY ajan järjestöille, joissa olen saanut olla mukana tekemässä ja kokemassa montaa unohtumatonta tapahtumaa, ja päässyt haastamaan itseäni. Kiitos myös vanhemmille, sisaruksille ja lähisuvulle, jotka ovat aina olleet tukena ja valmiina auttamaan opinnoissani apua tarvittaessa.

May we meet again.

Tampereella, 9.10.2019

Tomi Tuominen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuksen tausta	1
1.2 Tutkimuksen tavoitteet, rajaus ja menetelmät	2
1.3 Tutkimuksen toteutus ja rakenne	2
2. TIETOMALLINNUS RAKENNESUUNNITTELUSSA	4
2.1 Tietomallinnus rakennusallalla	4
2.2 Tietomallihankkeen vaatimukset	6
2.3 Autodesk Revit tietomallinnuksessa	8
2.4 Tietosisältö	9
2.5 Rajapintojen toiminta	11
3. RAKENNEANALYYSIN TIETOMALLI	13
3.1 Rakennesuunnittelun tiedot	13
3.2 Strusoft FEM-Design 18	15
3.3 Revit analyysimallin tiedot	18
3.4 StruSoft Revit Add-In -lisäosa	21
3.5 FEM-Design 18 mallinnus	22
3.5.1 Analyysimallin korjaus	22
3.5.2 Kuormien määrittäminen	23
3.5.3 Laskentamallin tukien määrittäminen	24
3.5.4 Elementtiverkotuksen luonti	25
4. CASE: PYHÄRANTA	27
4.1 Analyttisen mallin luonti Revitissä	28
4.1.1 Tietomallin näkymät ja mallin muokkaus	31
4.1.2 Analyttisen mallin tiedon lisääminen	37
4.2 Analyysimallin tiedonsiirto FEM-Designiin	40
4.2.1 Tiedonsiirron valmistelu	41
4.2.2 Tiedonsiirto	43
4.3 Analyysimallin käyttöönotto FEM-Designissa	45
4.4 Kuormitusten ja tukien lisäys	49
4.5 Mallin elementtiverkotus ja laskenta	51
4.6 Tulosten vertailu käsinlaskentaan	55
5. CASE-KOHTEEN TULOSTEN ARVIOINTI	59
6. YHTEENVETO	61
LÄHTEET	63

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Pyhärannan rakennemallin 3D-näkymä</i>	27
Kuva 2.	<i>Analyttisen mallin asetukset</i>	29
Kuva 3.	<i>Analytical model – työkalun näkymä</i>	30
Kuva 4.	<i>Material check – työkalun näkymä</i>	31
Kuva 5.	<i>Pyhärannan analyttisen mallin 3D-näkymä</i>	32
Kuva 6.	<i>Connection status –näkymä</i>	33
Kuva 7.	<i>Rajattu Connection status –näkymä</i>	33
Kuva 8.	<i>Muokattu analyttisten seinien näkymä on vasemmalla ja muokkaamaton analyttisten seinien näkymä oikealla</i>	34
Kuva 9.	<i>Analyttiset seinät ovat eri linjoissa</i>	35
Kuva 10.	<i>Shared parameter file -tiedoston sisältö</i>	38
Kuva 11.	<i>Seinien reunaehtoien lisäykseen käytettävän työkalun näkymä, jossa on esitettyinä työkalun tarjoamat vaihtoehdot</i>	39
Kuva 12.	<i>Vaakatasojen tunnisteen lisäykseen käytettävät vaihtoehdot</i>	39
Kuva 13.	<i>Tiedonsiirron työskentelyalustan alkunäkymä</i>	42
Kuva 14.	<i>Poikkileikkausten linkitys</i>	42
Kuva 15.	<i>Materiaalien linkitys</i>	43
Kuva 16.	<i>Tiedonsiirron raportti muokkaamattomasta mallista</i>	45
Kuva 17.	<i>Tiedonsiirron raportti analyttisen mallin rajauksen ja korjauksen jälkeen</i>	45
Kuva 18.	<i>Struxml-tiedoston avaamisen jälkeen tullut virheviesti. Viesti ilmoitti virheelliset elementit tunnisteen avulla</i>	46
Kuva 19.	<i>Tiedonsiirrossa virheelliseksi jääneet kuoret FEM-Designin näkyvässä</i>	46
Kuva 20.	<i>FEM-Designin Correct model –työkalu. Työkalulla on tarkoitus korjata mallissa esiintyviä pieniä virheitä</i>	48
Kuva 21.	<i>FEM-Designin kuormitusten havainnointi. Kuvassa malliin on lisättyinä rakenteiden omat painot</i>	50
Kuva 22.	<i>Pistetukiryhmän määrittäminen. Esitettyinä esimäärätty jäykkätuki</i>	51
Kuva 23.	<i>Elementointi verkotuksen asetuksia</i>	52
Kuva 24.	<i>Elementtiverkotuksen tihentymistä ongelmakohdassa</i>	53
Kuva 25.	<i>Elementtiverkotettu FEM-designin malli</i>	54
Kuva 26.	<i>Liitoskohtien voimia</i>	56
Kuva 27.	<i>Laskennan mukaiset tarkat tulokset. Jännityspiikit korostuvat tukien kulmissa</i>	56
Kuva 28.	<i>Laskennan tulokset tasattuina</i>	57

1. JOHDANTO

Digitalisaatio ja globalisoituminen mahdollistavat monelle alalle suuria teknisiä muutoksia. Rakennusalan suunnittelutyökalut ovat kehittyneet näiden seurauksena viime vuosina hyvin nopeasti lähes jokaisella rakentamisen osa-alueella. Tietomalli eli Building Information Model (BIM) ja tietomallintaminen ovat muodostuneet rakennusprojektien peruslähtökohdaksi. Tietomallintamisen avulla rakennesuunnittelun toimintatavat muuttuvat jatkuvasti. Rakennesuunnittelussa on jo käytössä edistyneitä laskentaohjelmia ja algoritmiavusteisten suunnitteluohjelmien kehitystä tapahtuu monella taholla. Tietomallipohjaisten suunnittelutyökalujen monipuolinen ja tehokas hallinta on yksi oleellinen työntekijän taito jo nyt, ja se tulee olemaan vielä merkittävämpi tulevaisuudessa. Tietomallien hallinnalla ja kehittyneillä käytännöillä voidaan tehostaa suunnittelijoiden ajankäyttöä ja vähentää mahdollisia virheitä. Samalla luodaan valmiudet pysyä kehityksen mukana.

1.1 Tutkimuksen tausta

Rakennusprojekteissa työskentelypohjana toimii koko ajan merkittävämmässä roolissa projektin tietomalli. Tietomallin hyödyntämisessä oleellisena osana on eri ohjelmistojen ja suunnittelualojen rajapinnat.

Tietomalliohjelmisto luo analyyttistä mallia samalla, kun rakennesuunnittelija piirtää kohteesta tietomallia. Suunnittelija on perinteisesti tehnyt rakenneanalyysia varten toisen malli. Rakennus on tällöin mallinnettu suunnitteluvaiheessa kahdesti, eivätkä tehdyt mallit ole toimineet yhdessä. Tällaisessa tilanteessa tietomalleihin voi helposti muodostua eroavaisuuksia, mikä voi aiheuttaa virheitä suunnittelussa. Toimintatapojen puutteesta johtuen ohjelmistojen välistä toimivuutta ei ole voitu kunnolla hyödyntää.

Tietomallien hyödyntäminen ja niiden tiedon hallinta on jo oleellinen osa rakennesuunnittelijan työtä. Tietomallien laajempi ymmärtäminen tehostaa suunnittelua ja jokapäiväistä työskentelyä. Kehittämällä toimintatapoja ja rajapintoja voidaan tehostaa rakennesuunnittelua, ja samalla vähentää uudelleen mallintamisen riskejä sekä virheitä. Työssä on tarkoituksena kehittää suunnitteluohjelmistojen käyttöä luomalla toimiva prosessi tiedonsiirtoon suunnitteluohjelmistojen välille.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet, rajaus ja menetelmät

Tutkimuksen tavoitteena on kehittää projektien tietomallien käyttöä hyödyntämällä mallinnusprosessin ohella tuotettavaa analyyttistä tietomallia. Tarkoituksena on selvittää analyyttisen tietomallin mahdollisuudet ja rajoitteet. Tutkimuksessa luodaan toimiva prosessi rajapinnan käyttämiselle ja analyyttisen mallin toiminnan selkeyttämiseksi.

Tutkimusta tehdään kahden ohjelman rajapinnan molemmin puolin, ja siinä keskitytään tiedonhallintaan ja suunnitteluohjelmiston toiminnallisuuden parantamiseen. Tutkimus rajataan tutkimuksessa tarkasteltavan yrityksen ohjelmistojen toimintaympäristön mukaiseksi. Suunnitteluohjelmistona toimii Autodesk Revit 2019 –tietomallinnusohjelmisto (Revit), jonka avulla luodaan kohteesta analyyttinen tietomalli. Rakenneanalyysin laskentaohjelmistona toimii StruSoft FEM-Design 18 (FEM-Design), jonka käytettäväksi Revitissä tuotetun analyyttisen tietomallin tulee soveltua. FEM-Designissa käytetään 3D Structure –moduulia, joka on kehitetty rakennuskokonaisuuksien ja rakenneosien analyysiin. Analyyttisen tietomallin on tarkoitus sisältää mahdollisimman tarkat tiedot kohteesta, jotta rakenteita ei tarvitse enää mallintaa uudelleen rakenneanalyysia varten.

Työn tärkeimpänä osana toimii case-kohteen avulla tehtävä käytännön tutkimus, jonka avulla selvitetään analyyttisen tietomallin tietosisällön toimivuutta laskentaohjelmiston lähtötietona. Tutkimus keskittyy rajapinnan toimivuuden kehittämiseen ja oikeelliseen mallintamiseen. Analyyttisen mallin toimivuutta testataan perustuskuormien laskennalla.

1.3 Tutkimuksen toteutus ja rakenne

Työssä sovelletaan case-tutkimusta, joka hyödyntää käynnissä olevan projektin tietomallia. Tämän tietomallin avulla selvitetään tehokkaat toimintatavat rakenneanalyysin tietomallin tuottamiselle ja tiedon siirtämiselle ohjelmistojen välillä. Case-tutkimuksen ohella suoritetaan kirjallisuustutkimusta, jolla kootaan tutkimukselle teoreettinen tausta. Kirjallisuustutkimusta varten on tutkittu alan kirjallisuutta, ohjekirjoja ja julkaisuja. Sen avulla tutkitaan mallintavaa suunnitteluprosessia, tietomallinnuksen käsitteitä ja ohjelmistojen toimintaa.

Työ koostuu tutkimuksen taustasta, kirjallisuustutkimuksesta, käytännön case-tutkimuksesta, prosessin luonnista ja tulosten pohdinnoista. Ensimmäisessä luvussa käydään läpi tutkimuksen tausta, tavoitteet, rajaus, menetelmät toteutus ja rakenne. Toisessa ja kolmannessa luvussa esitetään teoreettista taustaa ja ohjelmien toimintaperiaatteet. Neljännessä luvussa selvitetään analyyttisen tietomallin luonnin ongelmia ja mahdollisuuksia, sekä luodaan analyyttisen tietomallin käsittelyn prosessi

case-tutkimuksen avulla. Viidennessä luvussa arvioidaan case-tutkimuksen tuloksia ja pohditaan mahdollisia jatkotutkimusaiheita. Lopuksi tehdään yhteenveto tutkimuksesta.

2. TIETOMALLINNUS RAKENNESUUNNITTELUSSA

Tietomallintaminen on merkittävä osa rakennesuunnitteluprosessia. Sen vuoksi on alettu puhua mallintavasta suunnitteluprosessista sekä mallintavasta suunnittelusta. Tietomallit ovat suunnittelussa tärkeä työkalu ja niiden tehokas käyttäminen on oleellinen taito jokaiselle suunnittelijalle. Tietomallit ovat osana jokaista suunnitteluprojektia, ja tietomallit toimivat kommunikoinnin apuvälineinä.

Tämän tutkimuksen tavoite on kehittää Insinööritoimisto Jorma Jääskeläinen Oy:n suunnitteluprosessia hyödyntämällä käytössä olevan ohjelmistoympäristön tarjoamia mahdollisuuksia. Tässä osiossa tutkitaan tietomallintamisen keskeisiä osa-alueita, vaatimuksia ja käytettyjä ohjelmistoja.

2.1 Tietomallinnus rakennusalalla

Tietomalli voi olla rakennus kokonaisuudessaan digitaalisessa muodossa. Rakennuksesta voi olla erikseen eri suunnittelualojen tietomallit, jotka eroavat tietosisällöltään. Rakennuksesta voi olla myös yhdistelmätietomalli. Rakennusalalle on kehitetty julkaisusarja ”Yleiset tietomallivaatimukset 2012”, koska rakennusalalla tietomallintamisen käyttö on kasvanut nopeasti. Yhdistelmätietomallien käyttöä kehitetään jatkuvasti ja niiden käyttölaajuus ja hyödyntämistavat ovat kasvaneet merkittävästi viimeisen vuosikymmenen aikana. Käytön kasvaessa on entistä tärkeämpää määritellä mitä ja miten mallinnetaan. [15, p.2]

Tietomallinnus on tietokoneavusteista suunnittelua, ja se on yksi suunnittelun työskentelytapa. Tietomallinnuksen tuotoksena saadaan projektin tietomalli. [12, p.14] Projektin tietomalleja käytetään rakennusalan suunnitteluprosessien päärunkona, mihin voidaan tuoda tarvittavat tiedot jokaiselta suunnittelualalta. Tietoa siirretään hankkeen eri osapuolten välillä usein IFC-mallien avulla. IFC-mallit auttavat varmistamaan suunnitelmien yhteneväisyyden. Yhdistelmämallin tarkastelua tehdään koko projektin ajan, jotta yhdistelmämallia voidaan hyödyntää muunakin kuin valmiin projektin tietokansiona. [15, p.15-16]

Rakennesuunnittelussa hyödynnetään osaperusteista parametrissa mallintamista. Jokaisella osalla on omat parametrit, jotka ovat osakohtaisesti laadittu. Parametrisessa mallintamisessa huomioidaan rakennusosan mallintamiseen tarvittavat määritykset. Parametristen määritteiden avulla luodut osat voivat olla linkitettyinä tasoihin ja toisiin

tietomallin parametreihin. Linkitettyinä osat voivat muuttua samalla, kun toisia osia tai parametreja muutetaan. Parametriset osat voivat olla ohjelmassa valmiina, käyttäjän luomia tai ulkoisen toimijan tuottamia lisäyksiä, kuten tuotevalmistajan kappaleita. [18, p.46-47]

BuildingSMART Finlandin tekemien haastatteluiden perusteella uudisrakennuskohteet suunnitellaan lähes poikkeuksetta mallintamalla. Lähes kaikissa uudisrakennuskohteissa toteutussuunnittelua tehtiin mallintamalla projektit. Tietomallipohjainen suunnittelu on kohteissa tavanomainen vaatimus. Suunnittelulta vaaditaan vähintään yleisten tietomallivaatimusten mukaista toimintaa. Suunnittelija ja urakoitsijat ovat tietomallien suurimmat käyttäjät, jolloin kehitys tulee luontaisesti suurimpien käyttäjien tarpeiden perusteella. Tietomalleja ei vielä juurikaan hyödynnetä kiinteistön elinkaaren aikana, mutta tietomallien käyttö ylläpitotoiminnassa on laajentumassa. Kun rakennushanke oli toteutettu elinkaarimallilla, oli yhdistelmämalli ylläpidon käytettävissä. Tietomalliteknologia kehittyy kohti palvelinperusteisia järjestelmiä, mikä helpottaa tiedon saatavuutta. [16, p.1,5]

BIM-trendeinä on ollut BIM:n käytön yleistyminen laajassa mittakaavassa rakennusallalla. Samalla tietomallinnus on kehittynyt ja laajentunut eri toimijoiden käyttöön. Nämä ovat luoneet alalle myös uusia toimintamalleja sekä työtehtäviä. Yleistymisen seurauksena alalla on aloitettu paljon kehityshankkeita, kun osapuolet tutkivat tietomallien hyödyntämismahdollisuuksia. Integroidut työskentelymahdollisuudet ja tietomallinnuksen standardien luonnit ovat auttanut tietomallinnuksen yleistymistä. BIM-työkaluja ja -lisäosia löytyy eri ohjelmille, kun niiden tarve on kasvanut. BIM:n kehitys on lisäksi parantanut rakenneanalyysin tietokoneavusteisia mahdollisuuksia [18, p. 354-356]

BIM:n käytön yleistyminen muovaa rakennesuunnittelijan työkuva. BIM ja tietomallinnuksen laadulliset ja tuotannolliset edut ovat syrjäyttäneet perinteisesti tuotetut suunnittelutavat lähes kokonaan. Rakennesuunnittelijan perustaitoihin kuuluu tietomallinnusohjelmien käyttäminen. Tilaajien tietomallien käyttö ja vaatimukset ovat myös luoneet toimintaympäristön, jossa ilman tietomallinnusta on vaikea toimia. [18, p. 365-367]

Suunnittelu tehdään nykyään digitaalisessa ympäristössä. Lähes kaikki toimenpiteet luonnostelusta suunnitteluun ja analyysiin tehdään mallintamisen avustuksella. Tietokone on vahvasti mukana rakennusalan murroksessa, jossa ollaan siirtymässä täysin digitaaliseen ympäristöön. Tietokoneesta on tullut arvokas työväline, kun sen avulla löydetään ongelmakohtia ja tehostetaan suunnittelua. Algoritmiavusteiset

suunnittelumenetelmät ovat seuraava kehitysaskel. Algoritmi on suoritettava komentosarja, joka suorittaa tarkasti sille määrätyn polun tehtävät. Algoritmin tarkoituksena on suorittaa toistettavia tehtäviä automatisoidusti, jotta saadaan tietty päämäärän tulos. [17, p.16-20]

Rakennusalalla on paljon suunnitteluohjelmistoja, jotka hyödyntävät parametreja ja voivat hyödyntää algoritmeja. Useisiin ohjelmiin voidaan yleisten ohjelmointikielien avulla luoda algoritmeja. Alalle kehittyviä algoritmeja on luotu muun muassa Rhinoceros - ja Grasshopper - ohjelmistojen avulla. Rhinoceros 3D on kolmiulotteinen mallinnusohjelma ja Grasshopper visuaalisen ohjelmoinnin työkalu. Esimerkiksi näiden avulla kehitetään prosessi määrättyjä algoritmeja, joilla voidaan toteuttaa parametrilla suunnittelua. [17, 28-31]

Algoritmeja voidaan hyödyntää rakenteiden optimointiin, tehtävien automatisointiin tai monimutkaisten rakenteiden generointiin. Algoritmiavusteiset työtehtävät voivat olla tehokas työväline niin arkkitehdille kuin rakennesuunnittelijalle. Algoritmien avulla voidaan helpottaa arkisia työtehtäviä, mutta sillä voidaan myös suunnitella poikkeuksellisen vaikeita rakenteita. Koska suunnittelijalla on aina vastuu suunnitelmista, tulee algoritmiperusteisten työkalujen olla tarkasti suunniteltuja. Tietokone toimii aina vain sille annettujen raamien mukaan, jolloin suunnittelijan on tunnistettava mahdolliset virheet tietokoneen tuloksista ja huomioitava niiden mahdollisuus. Monimutkaisia rakenteita voidaan tuottaa algoritmien avulla [17, p.36-40]

Algoritmien luonnissa on vahva matemaattinen tausta, jotta ohjelmointi voidaan toteuttaa onnistuneesti. Lisäksi tietojenkäsittelytiedettä hyödynnetään algoritmeissa. Ohjelmoinnin avulla voidaan kehittää toimivat algoritmit. Kehitystyön avulla tietojenkäsittelyn ja matematiikan vaatimukset saadaan liitettyä samaan ohjelmistosovellutukseen, jolloin voidaan luoda toimivia algoritmeja. Kun parametrinen mallintaminen otetaan mukaan, voidaan suunnitella parametrisesti algoritmeilla. [17]

Tietomallintamiselle on rakennusalalla laajat kehitysmahdollisuudet. Koko ajan etenkin rakennesuunnittelussa ja rakennustuotannossa tutkitaan paljon eri vaihtoehtoja tietomallintamisen ja laskentaohjelmistojen kehittämiseksi. Tutkimusten perusteella tietomalleille määritty enemmän vaatimuksia ja tiedolle asetetaan uusia ehtoja. Etenkin tietokoneavusteinen suunnittelu kehittää tulevia toimintatapoja.

2.2 Tietomallihankkeen vaatimukset

Tietomallihankkeella tarkoitetaan rakennusprosessia, jossa käytetään tietomalleja merkittävänä osana tuotantoa ja suunnittelua. Eri suunnittelualojen tietomalleja voidaan

hyödyntää prosessin eri vaiheissa. Tietomallihankkeen avulla voidaan lisätä eri suunnitelmien keskinäistä vuorovaikutusta, kuten selvittää ristiriitoja törmäystarkastelujen avulla tai suorittaa määrälaskentaa suunnittelusta saaduilla tiedoilla. [12, p.14]

Tietomallinnuksen päätavoitteina on hanke- ja elinkaari prosessin tukeminen. Lisäksi tavoitteina mallinnuksella parannetaan rakentamisen laatua, suunnittelua, tehokkuutta, turvallisuutta sekä kestäväää kehitystä. Tietomallit mahdollistavat esimerkiksi useiden analyysien eri ratkaisujen vertailua, suunnitelmien havainnollistamisen ja rakennettavuuden arvioinnin sekä rakennushankkeiden tiedon hyödyntämisen käytössä ja ylläpidossa. Mallinnuksen onnistuminen vaatii määrätty vaatimukset ja hankekohtaiset tavoitteet. Mallinnusvaatimuksilla asetetaan vähimmäisvaatimukset tietomallien mallinnustarkkuudelle ja niiden tietosisällölle. [15, p.5]

Tietomallien rakennusosien ja reikäpiirustusten laatiminen tulee sopia aina projektikohtaisesti. Tietomallinnuksessa on projektikohtaiset vaatimukset tietosisällölle, laadunvarmistukselle, IFC-mallille, tietomalliselostukselle ja tietomallin dokumentoinnille. Vaatimusten avulla vähennetään mahdollisia ongelmia, mitä tiedonsiirtämisessä voi tapahtua, ja varmistetaan osaltaan oikeellisen tiedon kulkua. Säädettyjen toimintatapojen avulla tehostetaan suunnittelua havainnollistamisen ja yhteensovittamisen avulla. Vaatimusten avulla yleissuunnittelussa tuotetusta tietomallista saadaan lähtötiedot myös lujuuslaskennalle ja seuraavalle rakennesuunnittelun vaiheelle. [7, p.10-13]

Tietomallihankkeiden vaatimukset rakennemallin sisällölle määritellään projektikohtaisesti aina tarkemmin. Jokaiseen suunnitteluvaiheeseen on omat vaatimuksensa mallinnettavista rakenneosista ja niiden tarkkuudesta. Esimerkiksi yleissuunnittelussa tarkkuutena riittää lähtökohtaisesti mallinnus perusgeometrian ja sijainnin osalta oikein. Joitain rakennusosia ei vielä mallinneta tarkasti yleissuunnittelu vaiheessa, ellei ole sovittu projektikohtaisesti. Toteutussuunnittelussa rakennusosilta vaaditaan tarkka geometria ja sijainti sekä rakennusosa kohtaisia lisävaatimuksia. Esimerkiksi rungon rakenneosilta voidaan vaatia myös liittymiset ja valutarvikkeet. Suunnittelusopimuksen mukaisesti voidaan lisäksi vaatia muun muassa katosten ja vesikatto rakenteiden tarkkaa mallintamista. Koko ajan tietomallintamiselta vaaditaan enemmän ja tarkemmin tietoa projektien edetessä. Lisäksi mallintamisen hyödyntämisen kasvaessa osataan vaatia myös mallintamiselta enemmän. [7 p.20]

Tietomallihankkeiden yleisten vaatimusten lisäksi rakennesuunnittelulla voi olla omat sisäiset vaatimukset tietosisällölle, jotta tietomallille voidaan toteuttaa mahdollisesti

hyödyntämistä, kuten suorittaa rakennusanalyysia. Vaatimuksena voi olla muun muassa suunnittelun sisäisten toimintatapojen mukaiset mallinnusasetukset ja ehdot. Kun mallintaminen on tehty yhtenäisesti, voi tietomallin sisältöä tarkastella myös toiset suunnittelijat.

2.3 Autodesk Revit tietomallinnuksessa

Revit 2019 on yhdysvaltalaisen Autodeskin kehittämä BIM-ohjelmisto. Sitä käyttävät useat eri rakennusalan toimijat yhdessä Autodeskin tuoteperheen kanssa, ja se on merkittävässä laajassa käytössä maailmalla. Sitä voidaan käyttää arkkitehdin työosuuden mallintamisessa sekä rakennesuunnittelun mallintamislustana. Revitillä voidaan mallintaa myös lämpö-, vesi- ja ilmastointikanavat samaan tietomalliin. [1]

Revitillä mallinnettavat asiat voidaan karkeasti jaotella kahteen osa-alueeseen. Tietomalliosiin, sekä huomautusosiin ja detaljielementeihin. Tietomalliosilla tarkoitetaan kaikkia mallinnusosia eli niin sanotusti fyysisiä mallinnettavia kappaleita, jotka ovat havaittavissa 3D-näkymissä. Huomautus osat ja detaljit ovat teksti- ja viivamuotoista tietoa, jotka lisätään 2D-näkymiin lisäämään dokumentointia varten tarvittavaa tietoa. Erilaisia rakenneosia voi luoda ja lisätä manuaalisesti Revitin kirjastoon ja projektien tietomalleihin. Teksti ja viivatiedoilla tehostetaan näkymiä kuvaamaan tilanteet selkeästi. [1]

Revitin eri mallinnusosille on omanlaiset määrättävät ominaisuudet. Tyypilliset ominaisuudet jokaiselle osalle ovat kappaleiden geometria tiedot, tietomallissa tieto sijainnista, materiaali ja sen ulkonäkö, sekä mahdolliset reikätiedot. Jokainen elementti luodaan parametrien ja ominaisuuksien hallinnan avulla. Kaikki rakenneosat sidotaan tyypillisesti johonkin tasoon tai korkeuteen. Näin Revitin ominaisuusperusteinen mallintaminen voi tehdä muutokset automaattisesti jokaiseen näkymään. Jokaisella elementillä on tyyppiominaisuudet ja erilliset tapauskohtaiset ominaisuudet eli kappaleen omat ominaisuudet. Rakenneosia voidaan siis hallita tyyppien muokkauksella ja kappaleen omien ominaisuuksien avulla. [1]

Revitillä tuotettava tietosisältö voidaan siirtää toisiin ohjelmiin monessa muodossa. Tyypillisin tiedostomuoto on jokin yleinen dokumentointi formaatti eli tuloste näkymistä, kuten PDF. Toinen yleinen formaatti Revitillä tuotettavasta sisällöstä on erilaiset Autodeskin omat tiedostomuoto, kuten DWG- ja CAD-tiedostomuodot. Yleisessä käytössä on vielä IFC-tiedostomuoto, jonka avulla voidaan yhteensovittaa eri suunnittelualojen tietomalleja projekteissa. Tarvittaessa Revitillä voidaan tuottaa muitakin tiedostomuotoja joko suoraan tai lisäosien avulla. [1]

Revit-ohjelmistolle on kehitetty runsaasti lisäosia, joiden avulla on tehostettu eri suunnittelualojen toimintaa. Lisäosilla on luotu lisää toiminnallisuuksia Revittiin tai helpotettu tietosisällön tuomista tai viemistä. Lisäosien avulla voidaan esimerkiksi muokata Revitistä tietoa eri laskentaohjelmille sopiviin tiedostomuotoihin tai tuoda valmistajien liitososakirjasto suoraan käytettäväksi ohjelmistoon. Osa lisäosista on Autodeskin tuottamia ja osa eri ohjelmistovalmistajien sekä käyttäjien. [1]

2.4 Tietosisältö

Tietomallilla on aina jonkinlainen tietosisältö. Tietosisällölle voi olla erilaiset vaatimukset projektikohtaisesti. Tietosisällön tiedon tulee olla oikeellista ja vastata projektin vaatimia tietoja. Tieto voi olla monessa muodossa ohjelmistoissa, jolloin tietoa tulee osata hallita. Suunnittelijan on tiedettävä, mitä on suunnittelemassa, jotta tietosisältöä voidaan tuottaa oikeellisesti. Yhtä asiaa suunniteltaessa on huomioitava se myös suhteessa kokonaisuuteen. Mallintaessa suunnittelutehtävää kokonaisuuden tulee säilyä yhtenäisenä. Maskeerauksella voidaan korjata pieniä asioita tietomallin näkymissä helposti ja nopeasti, mutta silloin muutokset eivät päivitty itse tietomalliin eikä tietomalli vastaa enää todellista suunnitelmaa. Tällöin jää riski tietomallin koneelliselle virhetulkinnalle, jolla voi olla vaikutusta laskentaohjelmiin tai muihin osapuoliin. [13, p.38-39]

Rakennesuunnittelusta tuotettavalla tietomallilla on tietosisällölle suunnittelusopimuksessa sovitut vaatimukset. Vaatimukset voivat olla YTV osa 5 - Rakennesuunnittelun mukaiset, tai tietomallinnukselle on voitu määrittää omat projektikohtaiset vaatimukset. Yleensä rakennemalliin mallinnetaan ainakin kaikki kantavat rakenteet ja ei-kantavat betonirakenteet. Jokaiselle rakennusosan tietosisällölle on vaatimuksena, että siirrettäessä toiseen ohjelmaan niiden tieto siirtyy mukana. Vaatimuksena vähintään tieto sijainnista, rakennusosan tyyppi sekä rakennusosan geometria siirtyvät. Näiden tulee näkyä oikeellisesti myös IFC-mallissa. Rakennusosista voi olla vaatimuksena myös tuottaa tarkempaa tietosisältöä rakennemalliin, vaikka näiden ei tarvitse siirtyä juuri IFC-malliin oikein. [7, p.6]

Reikien tarkasta suunnittelusta saadaan tärkeää tietoa rakennesuunnittelulle ja rakennustuotannolle. Reikien ja varausten suunnittelu on sovittava projektikohtaisesti. Talotekniikka suunnittelija voi törmäystarkastelun avulla määrittää tarkasti reikien sijainnit. Reikien tietojen avulla suunnittelijat voivat täydentää suunnitelmiaan, jotta rakennusosista voidaan suunnitella toteutuskelpoisia. Reiät ja varaukset on hyvä myös mallintaa oikein tietomalliin, jotta todellinen tilanne on nähtävissä myös rakennemallissa.

Reikäpiirustusten avulla saadaan tietomallin tietosisältö täydennettyä oikeelliseksi. [7, p.15-16]

Tietosisällölle ja tietomallintamiselle tulee olla laadunvarmistuksen käytännöt. Laadunvarmistuksen avulla parannetaan suunnitelmien laatua tietomallintamisen tarjoamilla mahdollisuuksilla. Laadunvarmistus parantaa tietomalleista tuotettavaa dokumentointia. Tietomallien tieto tulee olla esitettynä yksiselitteisesti. Kun tietomalli on osa normaalia suunnitteluprosessia, saadaan laadunvarmistuksesta myös tarkastusapua rakennusosien suunnitelmille. [14, p.3-4]

Laadunvarmistuksella tietosisältö pidetään oikeellisenä. Sen avulla välitetään tieto laadukkaampana ja helpommin muunneltavissa kuin perinteisillä paperidokumenteilla. Kun laadunvarmistusta tehdään koko projektin tietomallien sekä IFC-mallien tietosisällölle, voidaan suunnitelmien etenemistä myös seurata. Suunnitteluprosessi on näin läpinäkyvämpi. Osa laadunvarmistusta on seurata mallinnuksen laatua jatkuvasti, ja tuottaa vain oikeellista suunniteltua tietoa tietomalliin. Hankkeissa sovitaan tietomallinnukselle tarkastuspisteet, joiden avulla osaltaan varmistetaan mallinnuksen laatua. Projektin lopussa mallinnuksen laatutasoa ei ole enää helppoa parantaa, joten laadunvarmistusprosessin on hyvä olla säännöllistä. Kun tietosisältö tuotetaan paremmin oikeellisenä, voidaan jatkossa vaatia tietomallinnukselta enemmän. [14, p.7-9]

Rakennesuunnittelijan vastuulle kuuluvat rakennemallin ja siitä tuotettavien dokumenttien oikeellinen tietosisältö. Usein laadunvarmistusta tehdään vertaamalla rakennemallia arkkitehtimalliin ja sen dokumentointiin. Tarvittavat muutokset tulee sopia arkkitehdin kanssa. Rakennemallista varmistetaan etenkin kantavien rakenteiden ja perusten perustiedot ja sijainti. Hyvään laatuun kuuluu, että osat ja kerrokset on selvästi määriteltynä ja nimettynä, sekä rakennemalli vastaa muiden osapuolien suunnitelmien tietoja. Analyysimalli voidaan tarkistaa erikseen vain laskentaohjelmassa. Rakennemallin tulee olla tietomallivaatimushankkeissa tarkasteltavissa tietosisällöltään yhdistelmä mallissa. [14, p.16-18]

Tietosisältöä ei tule turhaan pilkkoa osiin. Jos kopioitua tietoa luodaan ja sitä tietoa muokataan, jää tietosisältö alkuperäiseen lähteeseen väärin. Silloin suunnittelussa voi aiheutua ristiriitoja eri tuotosten välille. Tulosteiden luonti ja tietomallin dokumentointi on tiedon kopiointia, mikä on normaali osa tietomallien suunnitteluprosessia. Tulosteiden luonti on täysin hyväksyttävää, kun tulosteita ei lähdetä erikseen muokkaamaan. Kopioidun tiedon muokkaus ei palaudu automaattisesti alkuperäiseen tietomalliin. Kaikki muutokset tulisi tehdä alkuperäiseen tietomalliin, jolloin tietosisältö säilyy oikeellisenä.

Kaikki tieto on hyvä pitää yhtenäisenä niin, että kaikki muutokset saadaan päivitettyä eri tilanteisiin. [13, p.38-39]

Tietomallit voivat pitää sisällään runsaasti tietoa. Siksi tietomallin arvo on siinä itsessään, eikä varsinaisesti siitä tuotetuissa näkymissä. Tietomallin tarjoamat välittömät ja päivitettävät muokausmahdollisuudet antavat voittamattoman kilpailuedun käsin piirtämiseen verrattuna. Tietomallin tietosisältö voidaan hyödyntää useisiin tarkoituksiin, kun sitä osataan käsitellä ja julkaista eri muodoissa. Tietosisällön hallinta vaatii käyttäjältä taitoa, suunnitteluprosessin hallintaa sekä sopeutumiskykyä. [13, p.40]

Tiedon välityksessä on tärkeää huomioida tietosisältö. Tieto voi olla käyttäjälle tietomallissa selvää, mutta huonolla dokumentoinnilla tiedon vastaanottaja ei ymmärrä tietoa oikein. Tästä syystä tiedon viestinnässä tulee aina huomioida vastaanottajan näkökulma, jotta tieto välittyy oikeellisenä. Samalla lailla tiedonvälitys tulee toteuttaa oikean muotoisena ohjelmien välillä, jotta tietosisältö pysyy oikeellisenä ja työskentely on toimivaa. Periaatteellisesti kaikki suunniteltava tieto tulisi mallintaa. Suunnitelmat on esitettävä niin, että ne eivät virheellistä tietoa tai tilaa suunnitelmien etenemisestä. Tietomalliin luodaan vain ne asiat, jotka on todellisuudessa suunniteltu. Tämän tulisi olla suunnittelussa tavoitteena, vaikka se ei aina ole realistista. Näin voidaan viestittää toimivasti suunnittelusta niin tietokoneohjelmia kuin muita osapuolia. [13, p.39]

2.5 Rajapintojen toiminta

Rajapintojen avulla tietojärjestelmät keskustelevat keskenään. Rajapinnat ovat keskeisessä roolissa tietojärjestelmien osien kommunikoinnissa. Tietomallien hyödyntäminen vaatii niitä varten kehitetyt rajapinnat, jotta tietomallin tiedot saadaan hyödynnettyä. Tietomallit mahdollistavat myös laajat rajapinnan muodot ja tietoa voidaan siirtää useilla tavoilla. Normaaleissa projekteissa rajapintoja on osapuolten välillä sekä ohjelmistojen välillä. [13, p.41]

Rajapintojen tarkoituksena on siirtää tietoa kontrolloidussa muodossa. Rajapinnalle määritetään tietosisällölle ja tiedostomuodolle vaatimukset, mikä jättää mahdollisuuden tuottaa tiedon millä tahansa ehdot täyttävällä ohjelmalla. Tuotetun tiedon tulee toteutustavasta riippumatta täyttää sovitut vaatimukset. Tiedon vaatimukset määrätään, jotta jokainen osapuoli voi ymmärtää viestintään tarkoitetun tiedon sisällön, ja tieto voidaan luoda yhtenäisenä. Aina on olemassa vaara virhetulkinnoille, mutta sovitulla vaatimuksilla vaaran riskiä voidaan vähentää. [13, p.42-43]

Ohjelmistojen väliseen kommunikointiin luodut rajapinnat vaativat samalla tavalla tiedolle ehdot. Tietojärjestelmiin tiedon vaatimukset toimivat täysin tarkasti, koska

tietojärjestelmät toimivat ohjeen mukaan samalla tavalla. Koska tietojärjestelmät eivät lähtökohtaisesti sovelle, voidaan tietojärjestelmien rajapinnat määrittää tarkasti, jolloin välitettävää tietoa voidaan hallita. Rajapintojen tarkka määrittäminen vaatii tiedon hallintaa sekä ymmärryksen siitä, mitä tietoa halutaan siirtää ohjelmasta toiseen. [13, p.42-43]

Rajapinnan toteutuksessa tulee huomioida viestinnän tehokkuuden ja laadun kannalta toimivin vaihtoehto. Laadullisesti tietomallit ovat parhaimpia dokumentteja niiden suuren tietosisällön vuoksi, kun esimerkiksi paperidokumentin tieto on hyvin rajallista. Toimivan rajapinnan valinta perustuu viestinnän ja osapuolten tarpeeseen käytettävästä tiedosta. Lähtökohtaisesti tietomallista voidaan tuottaa laajemmin rajapinnan tietoa, kun taas paperidokumentilla voidaan tehokkaasti rajata tieto tarpeen mukaan ja esittää tieto tiivistetysti. Tietomalleille toteutetut rajapinnat tarjoavat laajemmin mahdollisuuksia edistää suunnittelua, kun tietomalleja voidaan jakaa ja tietoa esittää jalostetummassa muodossa. [13, p.50-54]

3. RAKENNEANALYYSIN TIETOMALLI

Rakenneanalyysin suorittamista varten luodaan tiedonsiirron prosessi (Liite A). Tiedonsiirron prosessin alkutilanteessa on projektin lähtötiedoista luotu valmis rakennemalli. Tästä rakennemallista Revit tuottaa automaattisesti analyyttistä mallia, jonka tarkastelua varten luodaan sille oma näkymänsä. Analyyttistä mallia tutkimalla yritetään havaita selviä puutteita ja virheitä mallista, kuten puuttuvia analyyttisiä osia. Analyysimallin tarkastelun ja rakennemallin muokkailun saavutettua tyydyttävän tason voidaan siirtyä tiedonsiirron työkalun valintoihin. Työkalun avulla linkitetään puuttuvat materiaalit- ja poikkileikkaukset sekä tarkistetaan analyttinen malli. Jos havaitaan puutteita tai virheitä, korjataan ne palaamalla rakennemallin muokkaukseen. Kun analyttinen malli on kunnossa, siirretään tieto FEM-Designiin ja avataan tiedosto laskentamallina. Jos siirrossa tai tarkistuksen yhteydessä havaitaan taas selkeitä puutteita, palataan muokkaamaan rakennemallia Revitissä. Pienet muokkaukset voidaan suorittaa myös FEM-Designissa. Kun laskentamallin runko on kunnossa, lisätään siihen tarvittavat tukiehdot, kuormat ja elementtiverkotus. Tämän jälkeen suoritetaan rakenneanalyysiä laskettavan ongelman mukaisilla vaihtoehtoilla.

Tiedonsiirron prosessi kuvaa yksinkertaistetusti prosessia siitä, miten Revitin rakennemallista saadaan siirrettyä tieto FEM-Designiin, ja miten saadaan tehtyä kuormien laskentaa varten valmis laskentamalli. Todellisuudessa muokkaamista ja pieniä korjauksia voidaan tehdä myös FEM-Designissa, eikä välttämättä tarvitse aina palata muokkaamaan Revitin tietomallia. Tarkoituksena on luoda laskentamalli niin, että sitä voidaan päivittää rakennemallin muutoksilla, jolloin oikean tiedon on hyvä olla lähtötiedoissa. Näin yksittäistä tietoa ei tarvitse korjata aina uudestaan. Ohjelmien välinen kommunikointi vaihtelee käytettävien ohjelmien mukaisesti. Toisilla ohjelmapareilla prosessin osat voivat olla erilaisia ja erilaisessa järjestyksessä ja välttämättä ohjelmien väliseen kommunikointiin ei tarvita lisättyjä työkaluja. Jokaisessa rakenneanalyysiin käytettävässä prosessissa tulee huomioida tietomallien tietosisältö ja käytettävien ohjelmien tarjoamat suunnittelu mahdollisuudet. Näin voidaan tehdä perustellut päätökset siitä, missä välissä tietty tieto on hyvä luoda, tai millä ohjelmalla sitä on paras käsitellä.

3.1 Rakennesuunnittelun tiedot

Rakennesuunnittelun pohjatietona toimivat rakennusprojektin lähtötiedot. Rakennesuunnittelun tietomallinnuksessa luodaan rakennemallia saadun tiedon

perusteella. Tähän rakennemalliin lisätään tarvittaessa muiden suunnittelualojen tuottamaa tietoa niin, että tiedosta huomioidaan ainakin rakenteelliselle kantavuudelle merkittävät tiedot. Rakennesuunnittelu toimii projekteissa yhdessä monien toimijoiden kanssa, joiden kesken projektien tietoja päivitetään projektien edetessä.

Rakennusprojektin lähtötiedot tulevat rakennesuunnittelijalle projektin tilaajalta ja pääsuunnittelijalta. Muilta suunnittelualoilta saadaan lähtötietojen lisäksi täydentävät tiedot. Projektin tietoihin kuuluvat muun muassa pinta-alatiedot, kohde, rakennuspaikka ja käyttötarkoitus. Kaikkien lähtötietojen perusteella rakennukselle määräytyy rakenteiden vaatimukset lakien ja säädösten mukaisesti. Rakennesuunnittelua koskevat lait ovat maankäyttö- ja rakennuslaissa määrättyinä. Säädöksiä on käsitelty Suomen rakentamismääräyskokoelmassa ja suunnittelu perustuu ympäristöministeriön asetuksiin, eurooppalaiseen yleisstandardeihin eurokoodeihin sekä sen kansallisiin liitteisiin. Lisäksi rakennesuunnittelussa hyödynnetään täydentäviä ohjeita, kuten alalla julkaistuja ohjekirjoja ja tuoteohjeita. [10]

Rakenneanalyysissä otetaan huomioon projektin lähtötiedot. Lähtötiedot saadaan projektin suunnittelun tilaajalta. Rakennesuunnittelijan tulee osaltaan varmistaa, että projektin mahdolliset toteutustavat täyttävät hankkeen vaatimukset, jotka on määritetty luotaessa projektille lähtötietoja. Suunnitelmien tietojen tulee olla oikeellisia kestävyys-, toiminnallisuuden ja toteutettavuuden suhteen. Projektille on sovittuna tietomallipohjaiselle suunnittelulle hyödyntäminen ja laajuus tarpeet sekä tietomallin vaatimukset. [11] Jos projektin tietomallista vaaditaan paljon tietoa, voidaan tietomallia hyödyntää paremmin myös rakenneanalyysiin. Rakenneanalyysin tulosten avulla voidaan luoda tarvittavia asiakirjoja projektille ja varmistetaan tuotettujen asiakirjojen oikeellisuus.

Analyyseja tehtäessä tietokoneavusteisesti pitää huomioida virheiden mahdollinen vaikutus. Virheelliset tulokset heikentävät suunnitelmien laatua. Esimerkiksi tietoa voidaan tuottaa väärin eri ohjelmiin, analysoinnissa voidaan tehdä oletusvirheitä ja analyysin tuloksia voidaan tulkita virheellisesti. Jokainen mahdollinen virhetilanne kasvattaa virheiden riskiä, ja virheet heikentävät analyysien luotettavuutta. Yksiselitteinen esitys kaikesta tarpeellisesta tiedosta on edellytys luotettavalle analyysille. Tämä ei onnistu automaattisesti, koska rakennesuunnittelussa voi jäädä tietomalliin helposti sisäisiä ristiriitoja sekä puutteellista tietoa. Toimivat rajapinnat auttavat pääsemään eroon puutteellisesta ja ristiriitaisesta tiedosta. Suunnittelijan tulee tunnistaa mahdolliset virhekohdat oikeellisen tiedon tuotolle rakennesuunnittelussa. [13, p.62]

Rakennesuunnittelun tiedot tuotetaan tietomalleilla. Oikein käytettynä tietomalleilla voidaan lisätä analyysien luotettavuutta. Tietomallit itsessään eivät sisällä ristiriitoja, ellei suunnittelija ole luonut sellaista tilannetta itse malliin. Tällöin voidaan puhua enemmän väärästä ja puutteellisesta tiedosta. Tietomallit helpottavat rakennesuunnittelun havainnointia, jolloin systemaattisesti voidaan tunnistaa tietomallista puutteellisen tiedon kohtia. Tietomalleilla analysoitaessa ei tule analyysissa inhimillisiä virheitä, koska analyysi toimii aina samalla tavalla. Ohjelmointivirheet ovat tällöin tunnistettavissa ja ennakoitavissa. Tietomallien käyttäminen luo kuitenkin omat virhelähteet. Pienet mallinnusepätarkkuudet tai sovelletut tietomallin luontitavat voivat aiheuttaa analyysiin virheitä, kun analyysi lukee tiedon tarkasti tai vaatii tiedon olevan mallinnettu millilleen oikein. Esimerkiksi palkkityökalulla luotua ontelolaatastoa analyysiohjelma ei tunnista yhtenäiseksi, vaan se lukee tiedon palkkeina. [13, p.64-66]

3.2 Strusoft FEM-Design 18

Strusoftin FEM-Design 18 on elementtimenetelmää hyödyntävä laskentaohjelmisto. FEM-Designissa on useita suunnittelu moduuleita, joista tässä tutkimuksessa keskitytään 3D Structure -työskentelyalustaan. FEM-Designilla voi suorittaa elementtimenetelmällä esimerkiksi lineaarista statiikan analyysia määritettävälle rakennetyypeille, toisen kertaluvun teorian laskentaa, dynaamisen värähtelyn analyysia, halkeilun analyysia ja kehityksen seuranta ja maanjäristyskuormitusten laskentaa. Lineaarisella analyysilla tulokset ovat aina solmujen siirtymät, tukireaktiot ja elementtien sisäiset voimat tai jännitysrasitukset. Analyysi pyrkii poistamaan epätodelliset epäjatkuvuuskohdat laskennan tuloksista, joita elementtiperusteisesta laskennasta voi aiheutua. [4, p.7-8]

Yksinkertaistettuna FEM:ssä pilkotaan rakennus yksinkertaisiin osiin, jotka kuvaavat rakenteiden toimivuutta yksinkertaistetussa muodossa. Nämä osat ovat kiinni toisissaan solmupisteiden avulla. Näiden osien ja solmujen sekä laskentayhtälöiden avulla suoritetaan laskenta. Kuormitusanalyysilla laskenta suoritetaan siirtymien tasapainotilanneyhtälöillä rakenteille. Elementtimenetelmän toteutettu laskenta sisältää useita satoja tai tuhansia yhtälöitä. Tämä pakottaa käyttämään tietokoneperusteista laskennan suoritusta. Elementtimenetelmällä laskettu arvo on likimääräinen, jonka tarkkuus on suhteessa elementtiverkotuksen tiheyteen, jos tilanne ei ole erittäin yksinkertainen. Elementtimenetelmällä selvitetään numeerista arvoa tarkasti määrättyyn ongelmaan. Hyödyllisyys elementtimenetelmässä tulee sen monipuolisuudessa. Elementtimenetelmän avulla voidaan selvittää lähes mikä vain satunnainen tilanne, kun se on toteutuskelpoinen. [2, p.1]

Elementtien viivat ja pinnat kuvastavat pilkottuja rakenteita. Elementit ovat joko viivoja nelikulmioita tai kolmioita, jotka liittyvät solmupisteiden avulla toisiinsa. Solmupisteissä elementeillä on keskenään samat siirtymäominaisuudet. Elementit ovat sidottuina toisiinsa solmupisteiden avulla. [2, p.3]

FEM-Design käsittelee 2D ja 3D kappaleet lähinnä kuorielementteinä. Kaksi- ja kolmiulotteisilla kuorilla on yksi merkittävä ero. Kaksiulotteiset osat ottavat vastaan ja laskevat ainoastaan tasoa kohtisuoraan olevia vaikutuksia, kun kolmiulotteiset elementit voivat sallia kuormituksia useasta suunnasta samanaikaisesti. 2D-elementtien antamat tulokset ovat rajalliset verrattuna 3D-elementteihin, koska 2D osille on kaksi tai kolme vapausastetta solmua kohti. 3D elementit voivat ottaa huomioon samaan aikaan useampia vaikutuksia, kun niissä on jokaisessa solmupisteessä kuusi vapausastetta, kolme siirtymille ja kolme kiertymille. 3D elementtien avulla voidaan kuormien vaikutuksia rakenteisiin tarkastella tarkemmin. Analyysiportaalista riippuen elementit luodaan malliin 3D tai 2D elementteinä. Koko rakennuksen analyysin rakenneosat ovat 3D-elementtejä. [4, p. 38-47]

FEM-Design luo elementtiverkotusta laskentaa varten asetettujen asetusten sallimissa rajoissa. Elementtiverkotusten luonnille on viisi vaihetta. Aluksi suoritetaan elementtien kaarien tai viivojen määrittäminen, kolmioverkotuksen luonti määritettyjen viivojen avulla ja kolmioverkotuksen muuntaminen sekoitukseen neliön ja kolmion muotoisia elementtejä. Lopuksi optimoidaan verkotuksen solmupisteiden sijainti ja määritetään elementtien keskipisteet. Elementtien nurkkiin eli viivojen risteyspisteisiin, viivojen keskelle ja elementtien keskipisteisiin on lopuksi määritettynä elementtiverkotuksen solmupisteet. Automaattisella luonnilla saadaan alustava elementtiverkotus, jota jalostetaan ja kehitetään manuaalisilla työkaluilla. [4, p.48-50]

Kohteen mallintamisen tulee simuloida tulevaa fyysistä rakennetta mahdollisimman hyvin. Onnistunut analyysi elementtimenetelmässä vaatii oikeellisten solmujen ja elementtien lisäksi myös sen, että rakenteen fyysinen toiminta ymmärretään riittävän hyvin. Elementtien koko ja sijoittelu tulee toteuttaa niin, että tarpeelliset vaihtelut siirtymissä tulevat esille. Liian tarkka elementtien luominen taas kasvattaa turhaan laskenta-aikaa. Osa elementtimenetelmän hyödyntämisestä on osata toteuttaa riittävän optimoituja elementtiverkkoja. Laskennassa tulee aina tarkistaa tulokset, jotta ne voidaan todeta järkeviksi. Laskentaan voi jäädä virheitä, koska ongelman kuvaaminen ohjelmalle voi olla virheellinen, vaikka ongelma olisi teoreettisesti selvä. [2, p.6]

FEM-Designissa käytettävällä teorialla joissain paikoissa voi tulla elementtimenetelmällä äärettömiä sisäisiä voimia, jotka aiheuttavat tuloksiin jännityspiikkejä, kun

elementtiverkotusta jalostetaan. Ongelma voi kertautua verkotuksen jalostusta uusittaessa. Esimerkiksi pistevoimien kohdille, pistetukien kohdille, elementtien nurkkapisteisiin tai liitoskohtien ääripäihin voi muodostua jännityspiikkejä. Käytännössä jännityspiikkejä esiintyy eniten tukien kohdalla. Ongelma voidaan ratkaista luomalla elementtiverkotus niin, että ne luodaan erikoispisteiden kohdille optimoidusti. Toinen ratkaisu on parantaa laskentamallin mallinnusta tekemällä siitä tarkempi. Tarkkuutta voidaan parantaa tekemällä pistetuet aluetukina tai pistevoiman pienen alueen voimana, mikä vastaa paremmin todellisuutta ja eliminoi jännityspiikkien muodostumista. Kolmantena keinona pistemäisiin kohtiin voidaan käyttää jännitysten tasausalueita, jotka tasaavat jännityksen estäen epärealististen piikkien muodostumisen. Jännityspiikit voidaan huomioida linjoilla helpommin. Tarkastellessa analyysin tuloksia voidaan tulokset esittää tasaavassa muodossa, koska ohjelma laskee liitosvoimat koko linjalle tai elementille, josta vaikuttavat voimat voidaan tasata koko rakenteelle. [3, p.233-236]

Numeerisiin analyyseihin liittyy ongelmia, jotka on huomioitava analyysiohjelmien käytössä. Ensimmäisenä yleisesti numeerisissa analyyseissa tulee muistaa aina ohjelmistovirheiden mahdollisuus. Ohjelmien monimutkaisuus lisää aina virheiden mahdollisuutta, kun kaikkien eri tilanteiden läpikäyminen on mahdotonta ohjelmiston kehitysvaiheessa. Vasta laaja käyttö tuo tarpeeksi tilanteita virhetilanteiden paikantamiseen. Toiseksi analyysit eivät osaa huomioida mallinnus virheitä, koska tieto on oikeassa muodossa, mutta väärää suhteessa analysoitavaan asiaan. Virheitä voi tulla, koska todellinen rakenne joudutaan mallintamaan yksinkertaistetummassa muodossa. Esimerkiksi pilarin pistetuki vapaakappalekuvassa on todellisuudessa jonkin levyinen tukialue rakenteelle. Mallinnuksessa esiintyy myös usein inhimillisiä virheitä. [5, p.7-10]

Kolmantena virheenä on rakenteiden elementointi väärin laskentaa varten. Jos elementointijako ei osu oikein muiden rakenteiden kanssa tai elementtien koko ei ole järkevä suhteessa rakenneosan kokoon, aiheutuu laskennassa kuormien väärin jakautumista ja epävarmoja tuloksia. Neljänneksi analyysin tuloksiin voi aiheutua äärettömiä jännitys- ja sisäisen voiman vaikutuksia. Nämä aiheutuvat yksinkertaistuksista ja oletuksista, joita on tehtävä numeerisen mallin toteuttamiseksi. Todellisuudessa tällaisia jännityksiä ei pääse tapahtumaan, koska rakenteet toimivat yhtenäisenä ja tasaavat voimia. Käyttäjän on tiedettävä mahdolliset virhetilanteet ja todellisuudesta poikkeavat tilanteet, mitä numeeristen menetelmien laskennat voivat aiheuttaa, jotta tuloksia voidaan tulkita turvallisesti. [5, p.11-12]

Elementtimenetelmän käyttöön liittyviä epävarmuuksia käsittelevässä tutkimuksessa Alsuhairi ja Hedström havaitsivat, että hyvin rakennetusta ja tarkasta

tarkastusjärjestelmästä olisi merkittävää hyötyä FEM-perustaisessa analyysissa. Näin voidaan eliminoida perustavanlaisesta suunnittelusta aiheutuvia epävarmuuksia. Alsuhairi ja Hedström päättelivät, että ulkoisella tarkastuskomponentilla olisi entistä merkittävämpi hyöty monimutkaisten rakenteiden suunnittelussa. Suunnittelussa tulisi huomioida eri tavalla toteutettujen laskentojen tulosten eroavaisuuden mahdollisuus, vaikka suunnittelussa on entistä vähemmän aikaa monimutkaisimmille rakenteille. FE-analyysilla tietotaitoinen henkilö voi jokseenkin manipuloida analyysin tuloksia, mutta silloin ei voida varmistua tulosten toimivuudesta todellisuudessa. Muun muassa tästä syystä Alsuhairi ja Hedström päättelivät, että suunnittelun pitää pystyä vastaamaan tehokkaammin simuloidun tilanteen rakennuksen vaatimuksiin, jotta päästään haluttuun rakennuksen käyttäytymiseen myös todellisissa tilanteissa analyysien avulla. Saadun tuloksen ei tulisi olla välttämättä selvitetävän ongelman numeerinen ratkaisu, vaan sen sijaan tuloksen tulisi olla oikein toimiva rakenne todellisuudessa. [6, p.75-77]

3.3 Revit analyysimallin tiedot

Revit luo analyyttistä mallia samalla, kun ohjelmalla luodaan niin sanottua fyysistä mallia eli rakennesuunnittelun tietomallia rakennuksesta. Analyyttinen malli on yksinkertaistettu 3D-näkymä projektin rakenteellisesta fyysisestä mallista. Pilarit ja palkit esitetään viivoina, sekä seinät ja lattiat tasolevyinä tai pintoina analyyttisessä mallissa. Analyyttistä mallia luodaan projektin rakenteellisista osista. Jokaisesta rakenne-elementistä luodaan oma analyyttinen osa, joka toimii osana koko analyyttistä mallia. Lähtökohtaisesti analyyttinen osa on täysin linkitetty tieto sen lähtötietona olevasta rakenneosasta ja on riippuvainen siitä, mutta analyyttistä osaa voidaan käsitellä ja muokata sen luomisen jälkeen myös itsenäisesti, jolloin osa tiedosta säilyy linkitettyinä ja toinen osa tiedosta on osillensa itsenäistä. Analyyttisiä osia voidaan käsitellä myös itsenäisinä osina. [1]

Jokaisella analyyttisen mallin palalla rakennekappaleista on vähintään tietyt ominaisuudet. Ensin analyyttisellä osalla on rakenneosan parametrit eli rakenneosan paksuus leveys korkeus ja reikätiedot. Toiseksi siitä löytyy fyysisen materiaalin ominaisuudet, mitkä rakenneosalle on määritetty. Kolmantena analyyttisellä osalla on oma vakiosijainti, joka on suhteessa rakenneosaan. Neljäntenä päätietona on sijainti suhteessa projektioplaaneihin joko suhteutettuna tai kiinteänä. Analyyttisen osan perustietojen lisäksi osille voidaan linkittää tietoa reuna- ja tukiehdosta, kuormista sekä analyyttisen osan tyypistä. [1]

Revitissä on rakennekirjastossa käytössä kehitetyt tyyppirakenteet. Tyyppirakenteiden asetusten avulla voidaan omalta osaltaan hallita analyyttisen mallin luontia. Jokainen tyyppirakenteen voidaan erikseen valita muokattavaksi. Tyyppirakenteen tiedoista

voidaan hallita rakenteeseen kuuluvat kerrokset. Nämä kerrokset voidaan määrittää tarvittavaan järjestykseen. Jokaiselle kerrokselle määritetään vielä paksuus ja materiaali sekä sen lujuustieto. Tyyppirakenteeseen määritetään vielä kerrosten kuuluminen joko ydinrakenteeseen tai ulkoisiin rakenneosiin. Ydinrakenteen perusteella luodaan tyyppirakenteelle analyyttisen pinnan automaattinen sijainti. Jos ydinrakenteessa on useita eri kerroksia, määräytyy ydinrakenteen keskilinja näiden kerrosten yhteenlasketun paksuuden keskilinjalle. Kun analyyttistä mallia luodaan ja asetetaan pinnan linjan määräytyminen, niin linja asettuu tyyppirakenteen kerrosten mukaisesti. Jos tyyppirakenteelle ei ole määrättyä kantavaa rakenteellista kerrosta, ei rakenteelle luoda analyyttistä pintaa automaattisesti. Jokaisella analyyttisellä osalla on siis vakioprojektio kohta, jonka mukaan analyyttisen osan sijainti määräytyy, ja analyyttisen osan projektion sijaintia suhteessa vastaavaan rakenneosaan voidaan muokata. Projektio määräytyy joko koko elementin tietojen mukaan tai ydinrakenteen tietojen mukaan. [1]

Analyyttiset pinnat mukautuvat asetusten sallimissa rajoissa toisiinsa. Analyyttinen kohdistaminen on analyyttisten pintojen sijoittamista samaan pysty- tai vaakalinjaan, jolloin ne toimivat suorana seinälinjana tai vaakatasona. Analyyttinen kohdistaminen määräytyy rakenneosan elementin ominaisuuksien mukaan, joko automaattisella tunnistuksella tai projektiolla. Analyyttisellä kohdistamisella on myös hierarkia automaattiseen kohdistukseen. Hierarkian ylimmän osan projektion mukaan muut liittyvät osat kohdistuvat linjaan. Hierarkian kärjessä on ensin ensimmäisenä luotu elementti eli luontijärjestyksen mukaisesti. Jos elementin projektiota muutetaan, siirtyy muokattu elementti hierarkian kärkeen. Jos useampia elementtejä on muokattu, määräytyy hierarkia molempien tietojen mukaan. Kohdistaminen ottaa huomioon asetuksissa määritetyt rajat, jolloin analyyttiset pinnat eivät voi liikkua täysin vapaasti.[1]

Analyyttisen mallin automaattisessa tuottamisessa on mahdollista, että malliin jää teknisistä syistä virheitä, jolloin analyyttinen malli ei suoraan sovellu laskentaohjelmistoihin. Soveltavat muutokset on silloin tehtävä analyyttisille osille. Analyyttisten osien solmukohtia voidaan siirtää ja ohjata liittymään oikeisiin kohtiin. Projektoiden sijainti voidaan siirtää suhteessa muihin osiin. Solmukohtien avulla voidaan muokata myös analyyttisten osien muotoa ja pituutta tarvittaessa. Analyyttisiä osia voidaan laittaa pois päältä ja takaisin päälle. Lisäksi analyyttistä mallia voidaan muokata analyyttisten linkitys osien avulla. Analyyttinen linkki auttaa sitomaan kaksi solmukohtaa toisiinsa ilman analyyttisten osien siirtelyä ja muokkausta, joka voi olla estetty analyyttisten asetusten rajoitusten vuoksi. Analyyttinen linkki toimii liitossolmuna, joka voi olla jäykkä, vapaa tai tarkasti määrätty siirtymien ja kiertymän suhteen. [1]

Siirrettävään analyttiseen tietoon voidaan lisätä kuormat, reunaehdot ja tukiehdot. Kuormituksia voidaan lisätä piste, viiva ja aluekuormina jokaiselle osalle erikseen tai yleisesti. Kuormat voidaan jakaa Revitissä kuormitusryhmiin, niiden tyyppi voidaan määrittää, ja niille voidaan määrittää ominaisuudet x-, y- ja z- suunnassa. Kuormille voi lisätä tunnisteet ja lisäkommentit tunnistamisen selkeyttämistä varten. Reuna- ja tukiehdot voi määrittää samalla lailla eri rakenneosille erikseen. Reuna- ja tukiehdot voi määrittää vakioarvoilla tai tarkemmilla arvoilla sekä ehdoilla. Ehtojen ominaisuudet ovat suunta, tyyppi, translaatio ja rotaatio. [1]

Analyttisen mallille on automaattiset tarkistukset ja asetukset. Automaattinen tarkistus antaa varoituksia, kun luodaan mitä tahansa rakenneosaa, jos analyttisen mallin luonnissa tulee jotain ongelmia rakenneosan luonnin yhteydessä. Varoituksia annetaan myös osia muokatessa ja siirrettäessä. Varoitukset ilmoittavat päällekkäisyyksistä, epäjatkuvuuksista sekä rakenteellisessa ja analyttisessä mallissa, ja puutteellisista materiaalitiedoista. Lisää tarkastusehtoja voidaan säätää asetuksista. Myös sitä asetusta, kuinka tarkkaan näitä tarkistuksia suoritetaan, voidaan säätää. Asetukset antavat analyttisen mallin tarkastukselle määritykset, joilla voidaan myös valita mitä ehtoja tarkistetaan automaattisesti. Lisäksi analyttisistä asetuksista hallitaan sitä, miten eri analyttisten osien sallitaan liittyä toisiinsa. Liittymistä hallitaan asettamalla analyttisen mallin ja fyysisen mallin eroavaisuuksille mittaehdot. Lisäksi analyttisten pintojen etäisyydelle annetaan mittaehdot. Jos analyttisillä osilla on enemmän eroa kuin asetukset sallivat, eivät osat luo automaattisesti liitosta välillensä. [1]

Revitin analyttinen tieto voidaan linkittää laskentaohjelmiin Application Programming Interface (API) avulla. Kun tieto on linkitetty analyysisovellukseen, voidaan Revitissä ottaa vastaan analyysisovelluksessa muutettua tietoa, jolloin työskentely on mahdollista molempiin suuntiin. Tietoa voidaan vaihtaa suoraan API:n avulla tai siirtotiedostoilla. [1]

Periaatteellisena valintana tukiehdot ja kuormitukset luodaan FEM-Designin puolella. Näiden hallintaan ja muokkaukseen on enemmän tarjolla vaihtoehtoja FEM-Designissa kuin Revitissä. Lisäksi kuormien luonti FEM-Designissa mahdollistaa paremmin kuormatietojen hyödyntämisen sekä muokkaamisen eri projekteissa, jolloin saadaan hyödynnettyä jo luotua tietoa tehokkaammin. Tukiehtojen luonnissa FEM-Design antaa mahdollisuuden tukien toimivuuden tarkempaan määrittämiseen kuin Revitissä, jolloin tukiehdot on parempi luoda FEM-designissa.

3.4 StruSoft Revit Add-In -lisäosa

Strusoft Revit Add-In on tehty helpottamaan tiedonsiirtoa Revitin tietomallista FEM-Designin tietomallin pohjatiedoksi. Lisäosalla muokataan Revitin analyysimallin tietoa FEM-Design perusteiseksi 3D tiedoksi. Siirrettävälle tiedolle on ehtoja, jotta sitä voidaan hyödyntää laskentaohjelmassa. Ehtojen täyttämistä varten työkalussa on toiminnallisuuksia, joiden avulla voidaan varmistua oikean tietosisällön siirtämisestä.

Lisäosan ominaisuudet keskittyvät Revitin analyttisen mallin lähtötiedon muokkaamiseen määränpään ohjelman luettavaan muotoon. Revitissä olevaa analyttisen mallin tietoa muokataan tai jalostetaan. Lisäosan avulla määritetään tarkemmin oikeat materiaalitiedot ja poikkileikkaukset. Siirrettävään tietoon lisätään eri elementeille omat tunnisteet. Lisäosalla voidaan myös lisätä seinille ja lattioille tyyppitietoja. [9, p. 3-4]

Työkalun avulla voidaan ensin tarkistaa analyttisen mallin olemassaolo ja materiaalien oikeellisuudet sekä solmujen kiinnittyminen. Nämä ominaisuudet hyödyntävät revitin omia ominaisuuksia, jotka on muokattu yksinkertaisempaan muotoon. Toiminnallisuuksien avulla tunnistetaan mallista rakenneosia, jotka eivät sisällä riittäviä ominaisuuksia tai tietoja. Lisäksi analyttisistä osista voidaan tarkistaa liitosten kiinnittymisiä toisiinsa, vaikka kaikkien solmujen ei tule olla kiinni toisissaan. Tällä voidaan havainnoida analyttisen mallin toimintaa [9, p.4-8]

Siirrettäville seinille ja lattioille lisätään tietoa työkalun toiminnallisuuksilla. Seinille voidaan määrittää suoraan niiden reunaehdot tyyppivalinnoilla. Sen tarkoituksena on vähentää FEM-Designin puolella tapahtuvaa mallinnusta. Lattiatasolle lisätään omat tunnisteet, jonka perusteella laskentaohjelman puolella luodaan pinnat. Lisäksi jokaiselle rakenneosalle voidaan lisätä tunniste, jonka on tarkoitus helpottaa osien tunnistamista ohjelmien välillä. [8, p.3, 6, 9]

Rajapinnan tiedonsiirron työkalun avulla voidaan linkittää rakenneosien poikkileikkaukset ja materiaalit vastaamaan suoraan laskentaohjelman vastaavia tiedostoja. Tiedonsiirrolla voidaan siirtää rakenneosat, linjat, tasot, perustukset, plaanit, kuormitukset, epäkeskisyydet ja mallinnetut tuet. Välttämättä kaikkia ei ole rakennemallissa olemassa tai analyttisessä mallissa huomioitu. Näin ollen tiedonsiirtoon voidaan valita vain tarpeelliset osat. [9, p.17-30]

Reunaehdot voidaan lisätä nopeasti malliin työkalun avulla, joten periaate valintana luodaan perustyyppi reunaehdoille työkalulla. Tarkoituksena valinnalla on nopeuttaa ja yksinkertaistaa prosessin työskentelyä. Jos osien yksittäisiä reunoja tulee muokata,

tehdään se FEM-Designin puolella, koska yksittäisten ehtojen kontrollointi on selvempää.

3.5 FEM-Design 18 mallinnus

FEM-Designia voidaan käyttää kohteen mallintamiseen, mutta sen pääasiallinen käyttötarkoitus prosessissa on laskennassa. Ohjelman käytölle on luotu manuaali, jolla laskentaohjelman toiminnallisuuksia on avattu ja selvennetty. FEM-Designin työskentely aloitetaan rakennenäköymästä, jossa projektiin voidaan tuoda lähtötiedosto. Ensimmäistä näkymää käytetään rakenteiden ja tukien määrittämiseen. Toinen näkymä on kuormien määrittämistä varten ja kolmas elementtiverkotusta varten. Neljä näkymä on analyysia ja sen tuloksia varten luotu näkymä. Jokaisella käytettävällä näkymällä on toiminnallisuudet esitettynä omalla työskentelynauhallaan. Mallintamista varten voidaan luoda laattoja palkkeja sekä pilareita erikseen puusta, teräksestä tai betonista. FEM-Designissa on erikseen laskentatilat ja näkymät vielä betonille teräkselle ja puulle, joissa rakenneosia voi mitoittaa analyysin tuloksilla.

Betoni-, teräs- ja puuosien määrittäykset ovat suurilta osin samankaltaiset. Lisäksi voidaan mallintaa tarvittaessa yleismateriaalin kautta muita osia. Jokaiselle löytyy omat poikkileikkaus ja materiaalikirjastonsa. Jokainen kappale pitää sisällään kolmiulotteisen tietonsa, joka voi vaikuttaa kappaleiden osumiseen toisiinsa. Analyysin kannalta jokaisella kappaleella on oma pinta tai viiva, joiden mukaan laskentaa varten luodaan elementtiverkotukset. Osien mallintaminen on vapaasti tehtävissä projektin tilaan. Kaikkia rakenneosia ja niiden tietoja voidaan muokata niille määrättyjen tyyppien puitteiden rajoissa. [3, p.49-55, p.61-63]

3.5.1 Analyysimallin korjaus

FEM-designilla laskentamallin korjaukseen on kehitettynä muokkaustyökaluja. Tiedonsiirron yhteydessä tiedostoa avattaessa FEM-Design suorittaa tiedoston tarkistuksen, jolla se erottaa virheelliseksi tulkittavia elementtejä. Correct model -työkalu on pääasiallinen korjauksen apuväline, joka sisältää useita toiminnallisuuksia ja voi tunnistaa pienempiä virheitä, joista aiheutuu haittaa laskentaan. Analyysimallin korjauksen avulla voidaan havaita rakennemallista esimerkiksi päällekkäisyyksiä, seinien irrallisuuksia linjoista, liian pieniä alueita tai teräviä kulmia. Korjaustyökalulla voidaan myös korjata rikkiäisiä viivoja ja yhdistää hajautuneita osien alueita. Analyysimallin korjaus ja tarkistus ovat osa tiedonsiirron suorittamista. Vaikka FEM-Design voi avata sitä varten luodun tiedoston ilman virheilmoituksia, voi tiedostoon jäädä silti virheitä. [3, p.208-210]

3.5.2 Kuormien määrittäminen

Kuormitukset luodaan omassa erillisessä näkymässään omalla työskentelynauhalla. Kuormien määrittämistä varten tulee luoda kuormatyyppit, jotta kuormitukset ovat lajiteltavissa. Nämä kuormatyyppit ovat myöhemmin ryhmiteltävissä ja hyödynnettävissä kuormitusyhdistelmien muodostamisessa. Kuormituksille määritetään erikseen suunta, voiman suuruus ja vaikutusalue. Kuormalle voi olla myös esimäärätty tyyppi, kuten tuulikuorma. Ohjelmassa on hyödynnettävissä myös valmiiksi luotuja kuormien arvoja, jotka määräytyvät valitun maan ja eurokoodin tietojen mukaisesti. [3, p.148-165]

Omat painot huomioidaan FEM-Designilla sekä huomioimalla ne kuormitusryhmien määrittelyssä, että lisäämällä puuttuvat rakennekerrosten painot laskentamalliin. Koska FEM-Designissa rakenteista mallinnetaan kantavat kerrokset, voi omia painoja joutua lisätä moneen kertaan. Omien painojen kuormituksen suunta on aina pystysuuntainen, mutta eri moduuleissa niin sanottu pystysuora suunta vaihtelee. 3D moduulissa pystysuunta on z-akselinsuunta. Kuormien määrittäminen menee yleisen määrittelyjen mukaan, jolloin kuorma määrätään joko pistekuormana, viivakuormana tai tasokuormana. Kaikki kuormat voidaan joko luoda valmiisiin pisteisiin reunoihin tai pintoihin, tai luoda vapaasti määrittämällä viiva kerrallaan Kuormituksen alueita ja voimakkuutta voi säädellä työkalujen tarjoamissa puitteissa monimuotoiseksi. Viivakuormille voi määrittää kaksi arvoa, joiden mukaan se määräytyy. Yleensä yhdellä tasokuormituksella voi määrittää kolme pistettä, joiden mukaan kuorma määräytyy jonkinlaiseksi tasoksi. Monimuotoisemmat kuormat suositellaan mallintamaan erikseen. [3, p.168]

Lumikuormat voidaan määrittää joko manuaalisesti tai automaattisesti. Lumikuormien automaattinen luonti generoi lumikuormat kaikille rakennuksen yläpuolelta vapaana oleville tasoille. Lumikuormat voidaan myös määrittää vapaasti ja määrätä omaan kuormitusryhmäänsä. Hyötykuormien määrittelyssä sen sijaan ei ole automaattisia toimintoja, mutta sen määrittämisessä voidaan hyödyntää yleisiä kuormituksen vapaan määrittelyn toimintoja [3, p.175-178,186]

Tuulikuorman voi määrittää, joko manuaalisesti viiva- ja tasokuormien avulla tai hyödyntää tuulikuorman automaattista generointi toimintoa. Tuulikuormien generoinnille on oma työskentelyvalikkonsa, jonka avulla se voidaan määrittää kohdistumaan koko seinälle tasona tai kerrosten tasojen kohti viivakuormana. Tuulikuormien automaattisessa generoinnissa otetaan suoraan huomioon katon muodot, rakennuksen korkeus ja tuulen suunnat. [3, p.174, 178]

Harvemmin käytettyinä FEM-Designilla voi lisätä esimerkiksi lämpökuormituksia, sisäisiä voimia, suoraan tukeen vaikuttavia siirtymiä ja maanjäristyskuormia. Ohjelmalla voidaan lisätä vapaasti määrättyinä kuormia ilman määrättyjä rajoitteita. [3, p.187-199]

Kuormitusyhdistelyt voidaan tehdä joko manuaalisesti luomalla eri kuormitukset tai automaattisesti generoimalla. Manuaalisessa luonnissa määritetään kertoimet itse ja jokaiseen kuormitusyhdistelmään valitaan kuormat yksitellen. Kuormitusyhdistelyssä määritetään kuormitustilanne, esimerkiksi murtorajatilan mukainen kuormitus. Analyysi voidaan suorittaa mille vain tilanteelle, mutta määrittäminen auttaa ajamaan oikeat kuormitusyhdistelmät oikeille tilanteille ohjeiden suositusten mukaan. Automaattinen generointi tehdään eurokoodin mukaisesti käyttäjän luomien kuormitusten mukaisesti. Jos käyttäjä on luonut kuormitusryhmät, ohjelma hyödyntää sitä ja voi luoda oikeellisesti kuormitusyhdistelmät jokaiselle eri kerroinyhdistelylle. Kuormitusyhdistelmät voidaan tehdä valmiiksi ja tallentaa tyyppimääritelmiksi. [3, p.204]

3.5.3 Laskentamallin tukien määrittäminen

FEM-Designin mallinnustilassa hallitaan osien tuki- ja reunaehdot. Laskentamallille voidaan määrittää pistetukia, viivatukia sekä tasotukia. Jokainen tukimoduuli toimii hieman eri tavalla, mutta jokaiselle voidaan yhtä lailla antaa vapausasteita ja määrittää tuen jäykkyys. Rakennuksen rakenteet liittyvät toisiinsa reunaehtojen perusteella. Rakennus liitetään periajatuksella maahan tukien avulla. Tuet voivat olla esimerkiksi vapaita, jäykkiä tai jousitukia niille annetuista asetuksista riippuen. [3, p.117]

Jäykän tuen arvo voidaan määrittää globaaleista asetuksista, jolloin tukien määrittämisestä valittava maksimijäykkyys tulee globaalin asetuksen mukaisesti. Jokaiselle tuelle määrätään arvot liikkeelle ja kierrolle, sekä näille arvot vedon ja puristuksen suhteen. Ohjelmaan on luotu vakioasetuksia, joilla voidaan nopeasti määrittää esimerkiksi nivelellinen tai täysin vapaa tuki. Tukien ja reunaehtojen hallinta ja määrittäminen toimivat samantyyppisesti keskenään, mutta niitä hallitaan vain eri kautta. Rakennneosien reunaehtojen hallinta hoidetaan rakenneosien tietojen kautta, kun tukia hallitaan suoraan määritettyjen tukien avulla. Lisäksi voidaan hyödyntää välillisiä pisteestä pisteeseen, sekä linjasta linjaan analyttisiä liitoksia. Näillä liitetään kiinni sellaisia osia, jotka tulisi olla kiinni toisissaan. [3, p.118-121]

Reunaehdot voidaan määrittää joko esiasetetuilla reunaehdoilla tai vapaasti vapausasteet määrittämällä. Analyysiä varten reunaehtojen toimivuutta suhteessa toisiin osiin tulee miettiä. Kun seinälle ja välipohjalle halutaan toteuttaa nivelellinen liitos, tulee liitosten osapuolten toimia oikein keskenään. Jos seinän reunan kiinnitysheimo on

määritettynä jäykäksi, tulee tason reuna määrittää nivelelliseksi tueksi, jotta malli toimisi analyysissa oikein. Jos taas seinän reuna on niveellinen, tulee tason reunan olla taas jäykkänä määritetty. Vastaavasti ohjeistus suosittelee määrittelemään perustustuen jäykkänä, jos seinän reuna on määritettynä nivelelliseksi, jos seinän perustustuesta halutaan niveellinen. Tukien määrittämisessä epästabiilien tilanteiden välttäminen on tärkeää. [3, p.102, 108-109, 122]

3.5.4 Elementtiverkotuksen luonti

FEM-Designissa on oma työskentelynauha elementtiverkotuksen luonnille, jonka näkymään luodaan laskentamallista elementtiverkotuksen näyttävä ja sisältävä laskentamalli. Tässä näkymässä hoidetaan elementtiverkotuksen luontia ja muokkausta ennen laskennan työskentelynauhalle siirtymistä. Muodostettavat elementit voivat olla yksinkertaisempia 2D elementtejä, joilla on kolme tai neljä solmukohtaa. Vaihtoehtoisesti voidaan luoda monimutkaisempia 2D elementtejä, jotka sisältävät kuusi tai yhdeksän solmukohtaa. Erot muodostuvat näiden kahden valinnan välillä laskennan nopeuteen ja tarkkuuteen. Tarkemmilla elementeillä laskenta kestää merkittävästi pidempään, mutta tulosten tarkkuutta saadaan parannettua. Palkeilla solmujen määriä voidaan vielä kasvattaa tarvittaessa. Esimerkiksi betonipalkeilla on hyvä olla minimissään 4 solmukohtaa. [3, p.225]

Verkotuksen luonti perustuu verkotukselle määrättyihin asetuksiin. Asetuksilla määrätään verkotuksen iterointikerrat, verkotuksen tiheys ja verkotuksessa huomioon otettavat tekijät. Huomioon voidaan ottaa esimerkiksi jännityspiikkien tasaus alueet, palkit ja pilarit, sekä kuormitukset. Tyypillisesti elementtiverkotuksen tekeminen aloitetaan harvemmalla verkolla, jonka jälkeen voidaan siirtyä lopulta tarkempaan elementtiverkotukseen, kunhan on välissä tarkistettu elementtoinnin toimivuus. [3, p.226-227]

Verkotuksen manuaalisella muokkauksella voidaan siirtää tai muokata pisteitä ja linjoja vastaamaan paremmin kuormitusta tai korjaamaan aiheutuneita virheilmoituksia. Manuaalisesti voidaan lisätä jännityspiikkien tasaus alueita, uudistaa pieniä alueita, jakaa elementtejä tai muuten muokata elementtien kokoja. Verkotuksen muokkauksen jälkeen voidaan automaattisilla generointi työkaluilla vielä edelleen parantaa verkotusta. [3, p.237]

Elementtiverkotuksen luomisessa voi tulla helposti ongelmia, jos analyysimallissa on pieniä eriäväisyyksiä rakenneosien reunoilla, epätarkkoja sekä pieniä alueita tai usean

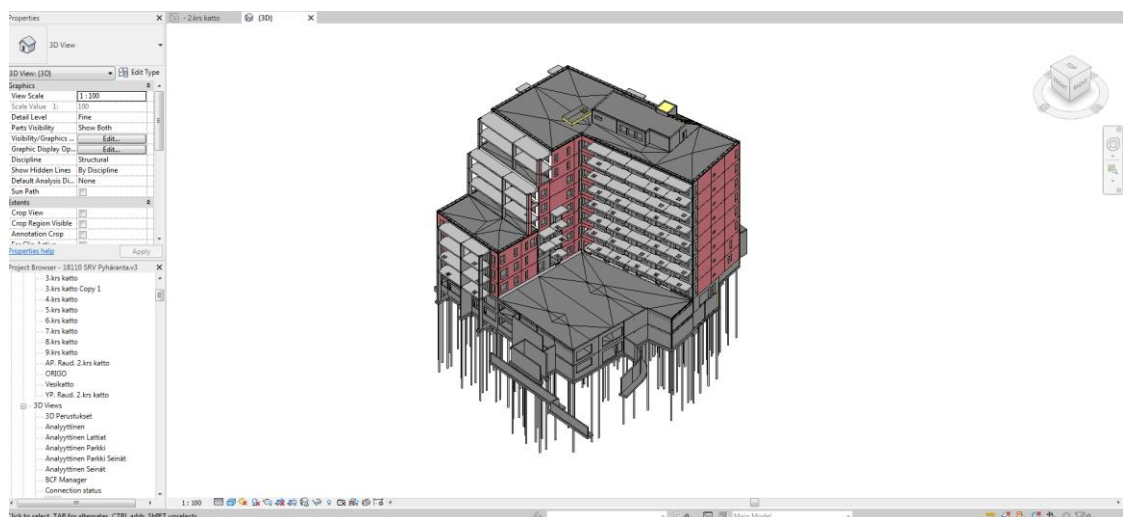
osan liitospisteitä. Hyvä elementtiverkko on edellytys onnistuneelle laskennalle, joten sen huolellinen valmistelu on kannattavaa laskennan parantamiseksi.

4. CASE: PYHÄRANTA

Työssä kehitetään toimivaa prosessia analyttisen tietomallin hyödyntämiselle. Case-tutkimuksen tarkoituksena on kehittää ohjelmistojen välisen rajapinnan toimintaa ja kohteiden tietomallintamista rakenneanalyysin lähtökohdista. Tietomallin toimivuutta rakenneanalyysissä testataan laskemalla ja vertailemalla rakennuksen perustuskuormia.

Pyhärannan kerrostalokohde koostuu kaksikerroksisesta parkkihalli- ja varastokerroksesta, sekä osaksi sen päälle rakennettavasta 8-kerroksisesta asuinrakennuksesta. Rakennukseen liittyy olemassa olevana rakenteena huoltotunneli. Rakennuksen muoto on haastava, koska ympäröivä maasto ei ole tasaista. Tontilla maanpinta nousee merkittävästi, jolloin maanpaine on merkittävä kuormitus monelle rakenteelle. Tontti sijaitsee vesistön läheisyydessä, jolloin perustamisolosuhteet ovat vaativat.

Pohjatietona analyttisen tietomallin rakentamiselle toimii kuvan 1 Revitillä tehty rakennemalli Pyhärannan kohteesta, jonka mallintaminen ei ollut tämän diplomityötutkimuksen aloitusvaiheessa täysin valmis. Case tutkimuksella voitiin siten tukea projektin etenemistä ja suunnittelua. Analyttisen mallin toimivuutta arvioidaan prosessin toistettavuudella ja suoritettavuudella. Laskentaan soveltuvuutta arvioidaan vertaamalla FEM-Designin tuloksia käsinlaskennan tuloksiin.



Kuva 1. Pyhärannan rakennemallin 3D-näkymä

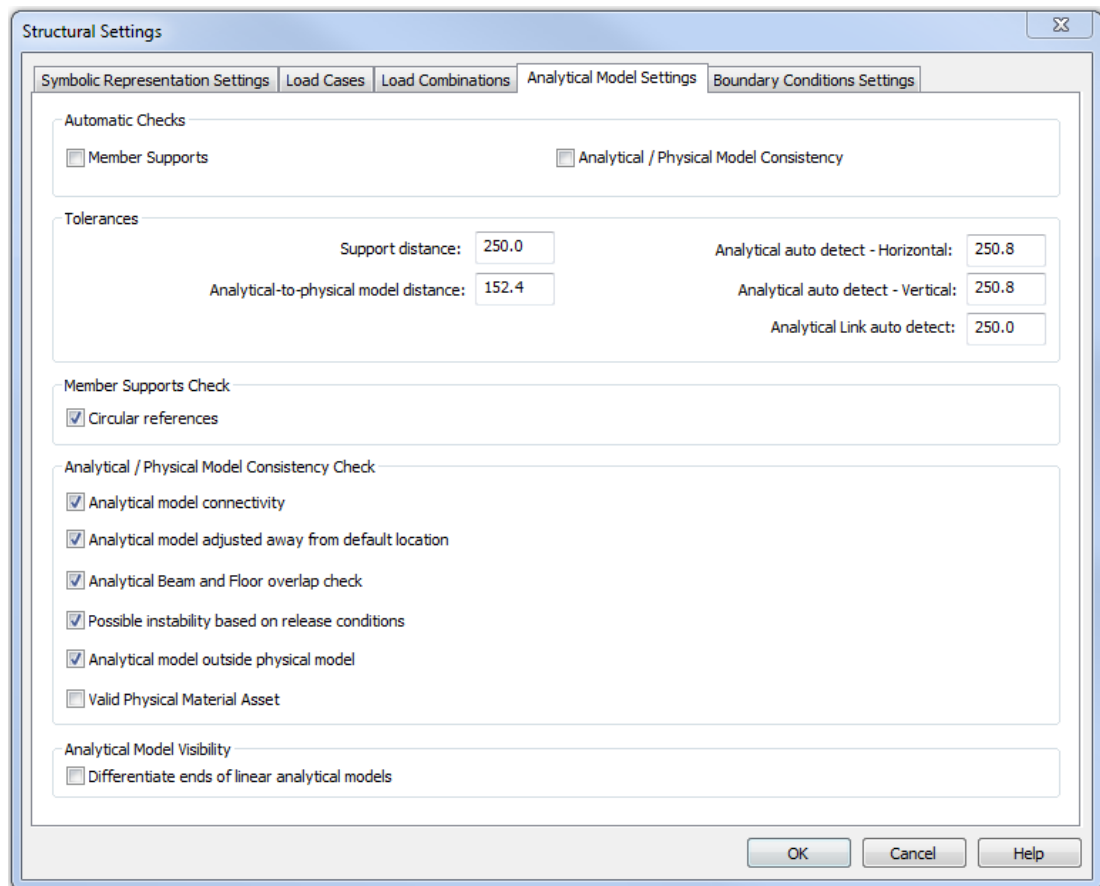
Työn alussa kohde jaettiin pienempiin osiin, jotta rajapinnan työskentelyä oli helpompi kehittää. Kohde jaettiin parkkihalliin, kerrostalon seiniin, kerrostalon lattiatasoihin ja

perustuksiin. Lopuksi kohdetta käsiteltiin kokonaisuudessaan ja tutkittiin kokonaisuudesta aiheutuvia ongelmia.

4.1 Analyyttisen mallin luonti Revitissä

Revit luo automaattisesti analyttistä mallia niille rakenteille, jotka on määritelty osaksi analyttistä mallia. Jokaisen rakenteen tai rakennusosan kuuluminen analyttiseen malliin voidaan määritellä mallinnuksen yhteydessä, ja niitä voidaan liittää tai poistaa analyttisestä mallista rakennesuunnittelun aikana. Kantavissa rakenteissa analyttinen malli on lähtökohtaisesti aina päällä, jolloin normaalin mallintavan suunnittelun yhteydessä saadaan tuotettua analyttisen mallin raakaversio. Raakaversiossa analyttisten osien reunat voivat olla päällekkäin, se voi sisältää ylimääräisiä analyttisiä osia sekä siinä voi olla runsaasti sijaintivirheitä. Rakennemalliin voi suunnittelussa helposti jäädä pieniä virheitä, jotka aiheuttavat myös ongelmia analyttisten osien muodoissa ja siirrossa laskentaohjelmaan. Kaikessa mallinnuksessa lähtökohtana tulee olla mahdollisimman oikeellinen mallinnus, jolloin ylimääräisiä korjauksia ei tarvitsisi tehdä, mutta pienten virheiden havaitseminen voi olla todella haastavaa mallintaessa. Analyttinen malli toimii osaltaan hyvänä mallinnuksen virheiden havainnoinnin apuna, joskin osa virheistä liittyy vain analyttiseen malliin ja sen toimintaan. Analyttisen mallin avulla huomattiin esimerkiksi elementin ylitse ulottuvia aukkoja, jotka vääristivät analyttisen kuoren muotoa.

Analyttisellä mallilla on omat asetuksensa joiden avulla analyttiset kuoret, tasot, solmut ja viivat liittyvät toisiinsa. Tärkein osa kuvan 2 asetuksista on toleranssit. Toleranssien avulla voidaan säädellä sitä, kuinka paljon analyttiset pinnat voivat liikkua suhteessa omaan elementtiin ja muiden elementtien analyttisiin kuoriin. Liikkumisen sallimisella on tarkoitus saada analyttiset pinnat kohtaamaan toisensa ilman muokkauksia. Käytännössä toleranssi asetukset hieman parantavat analyttisen mallin muodostumista, jolloin jokaista analyttisen mallin kuorta ja solmua ei tarvitse itse muokata kohdalleen. Suurin merkitys tällä huomattiin olevan siinä, että analyttiset vaakataso kuoret saatiin kohtaamaan analyttisten seinien kuorien kanssa.

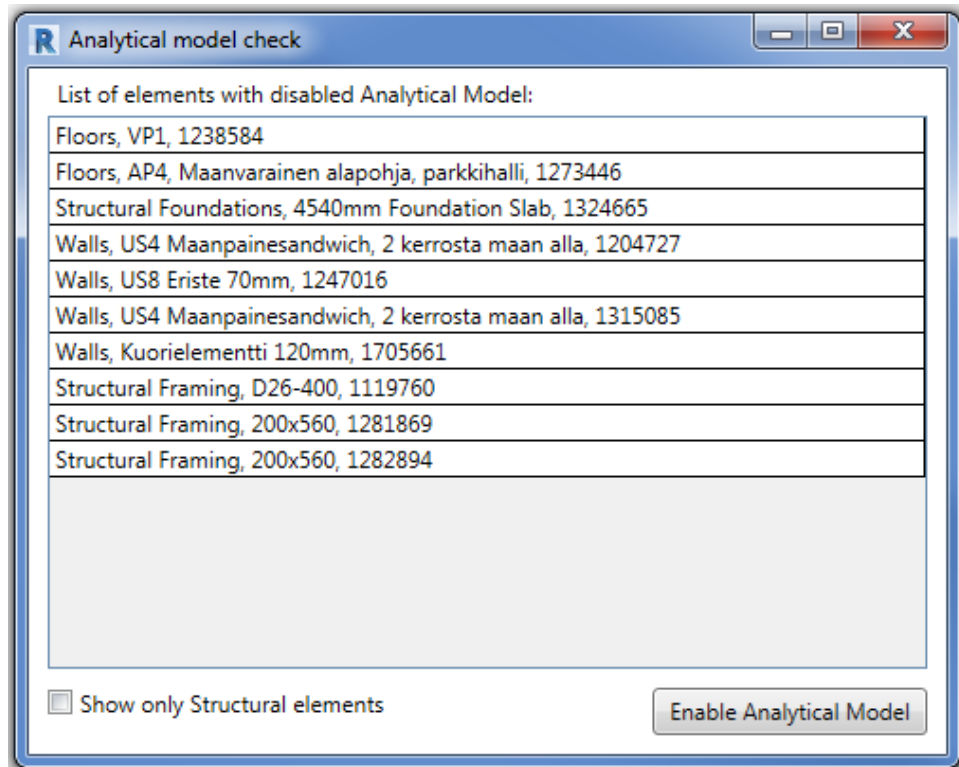


Kuva 2. Analyttisen mallin asetukset.

Analyttisen mallin luontia aloittaessa on hyvä tarkistaa Strusoft lisäosan työkaluilla, että tarpeelliset analyttiset osat ovat päällä. *Analytical model* -työkalun avulla saadaan lista koko projektin eri osista, joissa ei ole analyttistä mallia päällä. Listasta voitiin valita yksitellen kaikki osat, joille analyttinen kuori halutaan aktivoida. Toisella tapaa listasta voidaan tunnistaa jokin rakennetyyppi, ja mallin kautta aktivoida kaikkien kyseisen rakennetyypin elementtien analyttinen malli.

Analyttisen mallin tarkistus työkalulla on mahdollista rajata koko projektin eri osien listasta kaikki ne kappaleet, jotka on tehty Revitissä rakennemallissa. Esimerkiksi arkkitehtityökaluilla tuotetut kappaleet eivät näy listalla. Suurin osa projektin kappaleista tuotetaan rakennemallin työkaluilla, jolloin jokainen erityyppisellä nimellä tuotettu elementti näkyy listassa. Tämän takia lista laajenee helposti projektin edetessä, jolloin selvästi nimetty mallintaminen auttaa aktivoimaan oikeiden rakenteiden analyttiset kuoret. Esimerkiksi kuvan 3 tarkistustilanteesta voidaan huomata, että US4-maanpainesandwich rakenteelta puuttuu analyttinen kuori, joka voidaan aktivoida työkalun avulla. Valitsemalla tästä listasta tarkasteltavat rakenneosat, voidaan

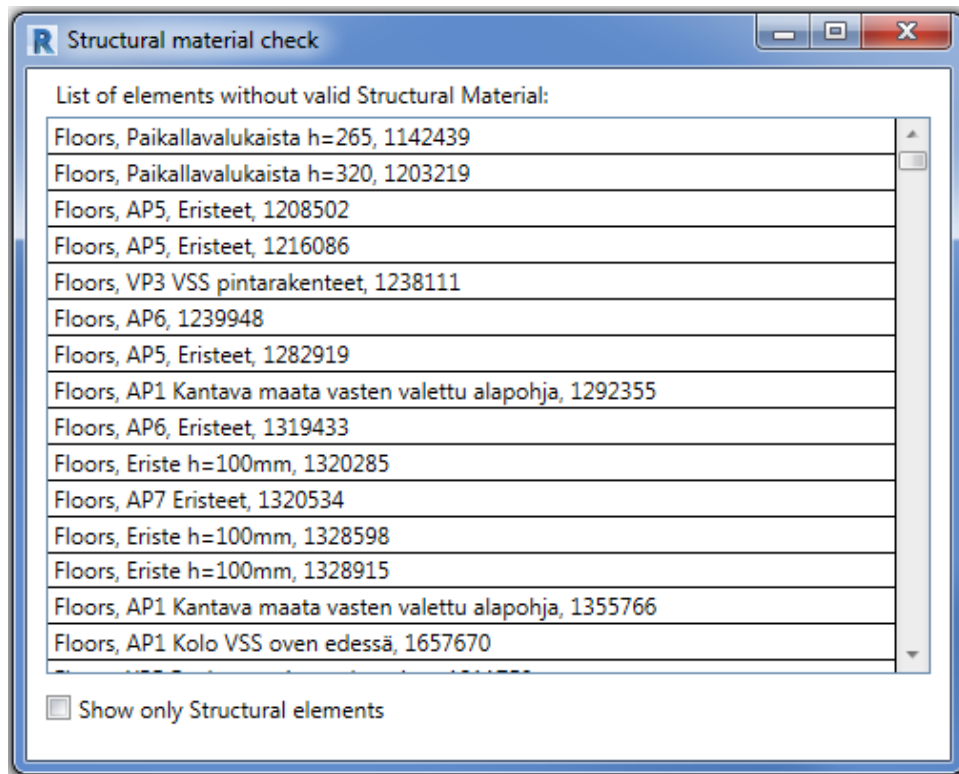
tarkastella valittuja elementtejä mallin 3D-näkymän kautta. Näin voidaan tarkastella tapauskohtaisesti, tarvitseeko rakenneosaa analyttisen kuorensa päälle.



Kuva 3. *Analytical model* – työkalun näkymä.

Rakenteelle, kuten sandwich-elementille, voi määrittää tasan yhden rakennekerroksen, jolle on määritettynä rakenteellinen materiaali, *Structural material*. Tällä materiaali kerroksella tulee olla määrätty materiaali, kuten teräs tai betoni. *Material*-työkalu antaa listan elementeistä, joiden määrättyjen rakennekerrosten materiaali tieto on puutteellinen. Materiaalin päivitys on valmistava toimenpide tiedonsiirrolle.

Kuvasta 4 voidaan huomata, että puuttuvien materiaali tietojen lista on pitkä. Edelleen, vaikka valittiin vain rakenneosaa kappaleet, lista säilyi suhteellisen pitkänä. Osittain listan pituutta selittää se, että yhdellä rakennetyypillä voi olla useita kymmeniä osia rakennemallissa. Näiden muokkaaminen onnistui rakennetyyppien ominaisuuksien päivittämisellä. Lista huomioi myös elementit, joilla ei ole analyttistä kuorta aktivoituna. Siksi tätä listaa ei ollut mitenkään järkevää käydä läpi niin, että jokaiseen kohtaan lisätään toimiva materiaali. Se ei monelle rakenteelle ole tarpeellista.



Kuva 4. Material check – työkalun näkymä.

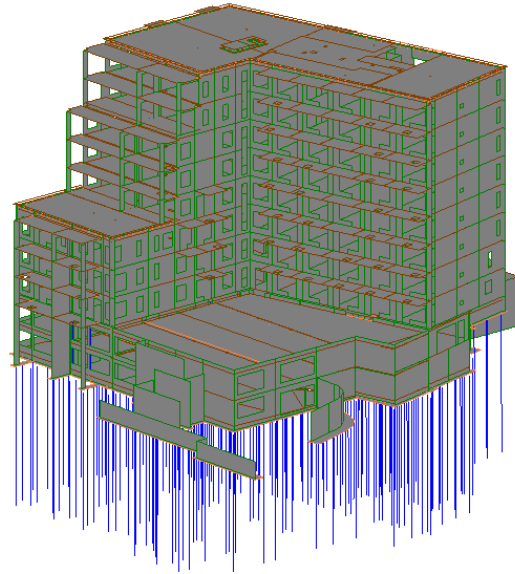
Oikea materiaali vaati rakennemateriaalin kerroksen ja määrätyn materiaalin. Esimerkiksi eristeillä on täysin oikeellinen tieto rakennemallissa ilman määrättyä rakenteellista kerrosta. Analyyttisen mallin siirto vaatii nämä tiedot, joten on järkevää päivittää ne rakenteet, miltä nämä tiedot puuttuvat, ja mille niiden päivityksestä on konkreettista hyötyä.

4.1.1 Tietomallin näkymät ja mallin muokkaus

Analyttisen mallin näkymä kannattaa luoda erikseen, jotta sen tietosisältöä on helpompi hallita. Näkymän luonti tapahtuu luomalla erillinen 3D näkymä projektiin, ja muuttamalla näkymä asetukset niin, että se sisältää halutut analyttiset osat, mutta ei rakennemallin osia. Rakennemallin osat piilottavat analyttiset osat tehokkaasti sisäänsä, koska analyttiset osat piirtyvät näkymiin viivoina ja pintoina.

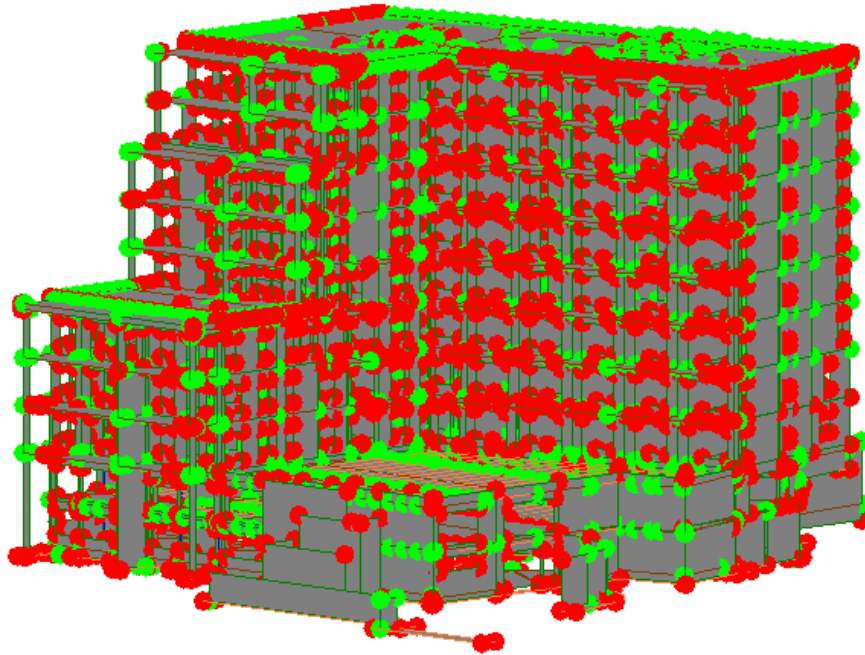
Kaikki analyttiset osat sisältävä 3D-näkymä on esitetty kuvassa 5. Tämän näkymän pohjalta aloitetaan luoda paremmin käytettävää analyysimallia. Tehokkaampaan näkymään valitaan näkyviin kaikki analyttiset kantavia rakenteita sisällään pitävät kategoriat. Tärkeintä on jättää pois havainnointia ja muokkausta mahdollisesti häiritsevät rakenneosat. Esimerkiksi solmukohdat voivat haitata näkymää ja saattavat hidastaa työskentelyä. Analyttisen mallin muokkausta varten on hyvä luoda myös erillisiä näkymiä. Nämä vastaavat koko projektin analyttistä näkymää, mutta niihin otetaan esimerkiksi

näkyviin pelkästään seinät tai pelkästään lattiat. Näin on helpompi havaita ongelmakohtia esimerkiksi seinien liittynöissä. Etenkin pelkistetyt analyyttisten pintojen näkymät auttoivat tunnistamaan puuttuvia tai päällekkäisiä kuoria, jolloin analyyttisen mallin tietoa saatiin tarkennettua.



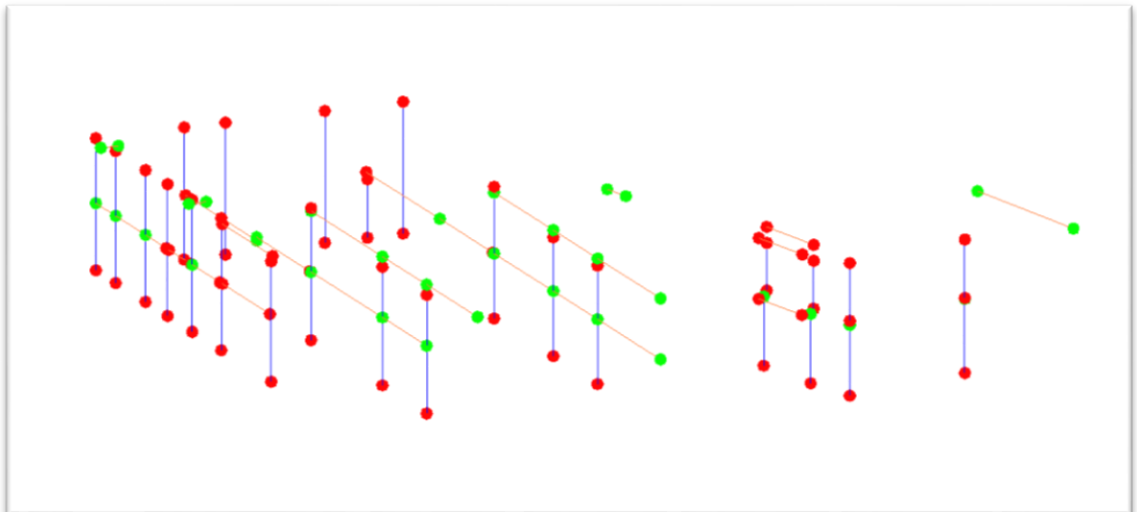
Kuva 5. Pyhärannan analyyttisen mallin 3D-näkymä.

Strusoft työkalulla voidaan luoda suoraan kuvan 6 mukainen Connection status -näkymä. Connection status -näkymä on hyvä luoda koko rakennuksen 3D-näkymästä, mutta enemmän hyötyä siitä on, kun keskittyy pienempiin rakennuksen osa-alueisiin. Kuvan 6 mukaisesti Connection status -näkymä havainnollisti hyvin sitä, mitkä eri kuorien, palkkien ja pilareiden solmukohtat ovat irrallaan ja mitkä solmukohtat ovat kiinni toisissaan analyyttisen mallin luonnin alkuvaiheessa. Vihreä pallo kuvastaa solmua, joka on liittynyt kiinni toiseen solmukohtaan. Punainen kuvastaa solmua, joka ei liity toiseen solmuun. Connection statuksen avulla ei ollut tarkoitus saada jokaista solmukohtaa vihreäksi, vaan tunnistaa epäjatkuvuuksia ja suuria puutteita solmukohdissa, ja puuttua nimenomaan niihin. Etenkin muokkaamattomasta Connection status näkymästä voidaan huomata, ettei jokaista solmukohtaa ole järkevää saada vihreäksi. Jokaiseen analyyttisen osan pinnan nurkkapisteeseen muodostuu työkalun generoinnilla solmukohta. Esimerkiksi ikkuna-aukkojen solmukohtien ei voida olettaa liittyvän toisen analyyttisen pinnan solmukohtaan. Analyyttisellä muokkaukseen tarkoitetuilla työkaluilla voitiin paremmin havaita aukotuksen ero muista solmukohdista, mutta niiden hyödyllisyys osoittautui hyvin rajalliseksi.



Kuva 6. Connection status –näkymä.

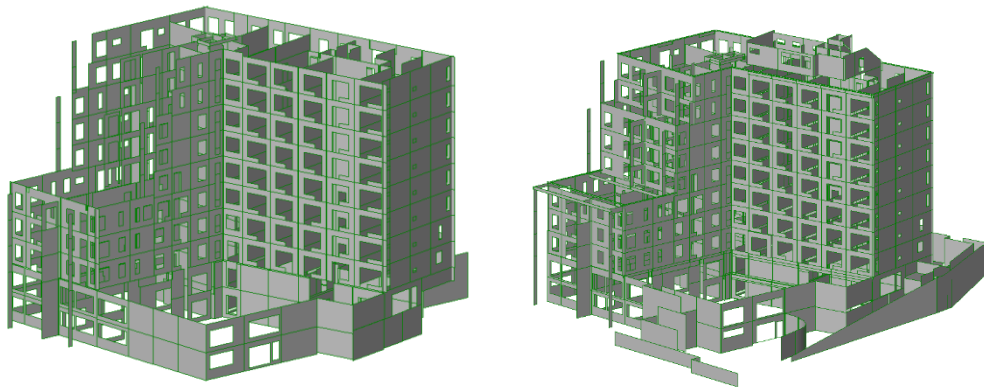
Kuvassa 7 on rajattuna vain parkkihallitason pilarit ja palkit, joiden solmukohdat ovat huomattavasti selkeämmin käsiteltävissä. Rajattujen näkymien avulla saatiin liitettyä etenkin palkki- ja pilarirakenteiden solmukohdat kiinni toisiinsa. Luoduilla näkymillä voitiin tarkastella tehokkaammin mallia ja tunnistaa ylimääräisiä analyttisiä pintoja.



Kuva 7. Rajattu Connection status –näkymä.

Seinärakenteista voi olla muodostunut useita päällekkäisiä analyttisiä kuoria, joista osalle ei ole tarvetta laskennassa. Laskennan kannalta ylimääräisistä seinärakenteista

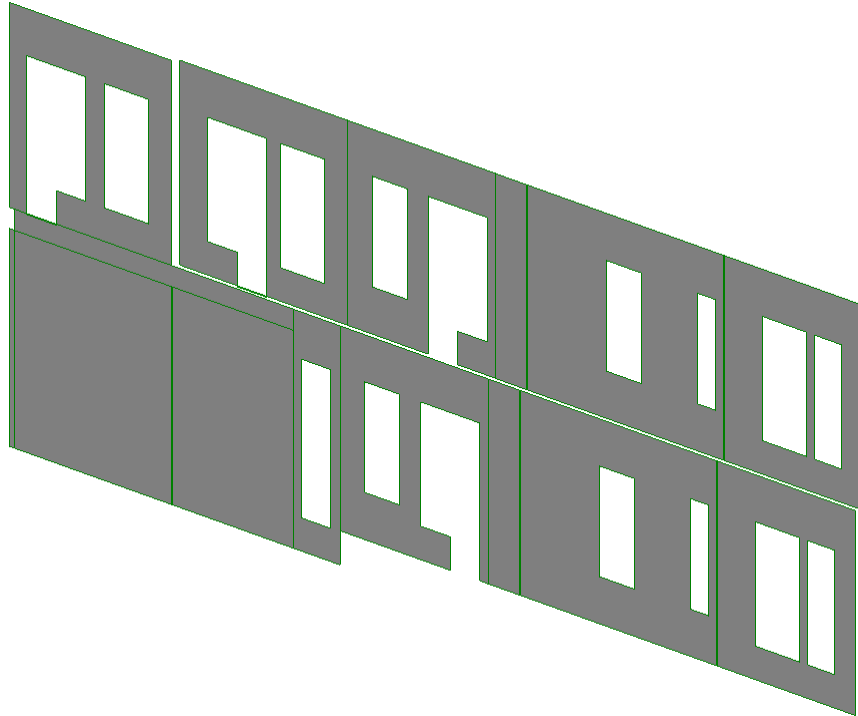
tai seinämäisistä osista, kuten eristeistä ja kantamattomista väliseinistä, tuli poistaa analyttisen seinän valinta. Se tapahtui helpoiten valitsemalla kaikki projektin yhden seinärakenteen tyyppiset seinät kerralla ja sammuttamalla analyttisen seinän mallin valinta seinän ominaisuuksista. Kuvassa 8 on havainnoitu seinien muokkauksen vaikutusta analyttisten seinien näkymään. Muokkaamattomasta näkymästä on karsittu esimerkiksi kantamattomia seiniä ja itsellään toimivia maanpaineiseiniä, jolloin näkymässä on helpompi muokata analyysin kannalta merkittäviä osia. Myös yksittäisiä seiniä joutui kontrolloida, ja mallista tuli poistaa analyttisiä seiniä päällekkäisyyksien takia, kun etenkin eristeiden analyttiset kuoret menivät päällekkäin viereisten kantavien rakenteiden kanssa. Osaan vastaavista tilanteista voitiin vaikuttaa myös analyttisen mallin asetuksilla, mutta näitä asetuksia ei kannata muuttaa paljoa, koska ne vaikuttavat malliin merkittävästi. Analyttisen mallin asetukset tuli asettaa aluksi yhdelle järkevälle toleranssi tasolle. Näitä asetuksia tarvitsi muuttaa niin, että parkkihallin kansialueen ja kerrostalon ulkoseinälinjan vierekkäiset kantavien rakenteiden elementit saatiin erilleen toisistaan.



Kuva 8. *Muokattu analyttisten seinien näkymä on vasemmalla ja muokkaamaton analyttisten seinien näkymä oikealla.*

Toinen seinien muokausvaihe on seinäkuorien asettaminen linjaan toistensa kanssa, jotta analyttinen malli toimii laskennassa. Esimerkiksi kuvassa 9 seinät ovat hieman eri linjoissa, jolloin rakenneanalyysiä ei saada suoritettua oikein. Kuvasta 9 on havaittavissa päällekkäisyyksiä seinien kanssa, sekä geometrinen virhe, mikä näkyy myös kuvassa 19. Analyttinen seinä ei ole aina automaattisesti oikealla kohdalla, vaan sen analyttinen sijainti tulee määrittää oikeaksi. Tietomallinnusvaatimusten takia seinäelementeillä mallinnetaan oikeankokoiset saumavälit, jolloin analyttiset pinnat eivät kohtaa. Seinäelementtien pystysauma voidaan jättää malliin, koska tästä ei ole haittaa pystykuormiensiirtymisessä, ja mahdollisten saumojen mallintaminen on helpompi toteuttaa mallinnettuun väliin FEM-Designissa vaakakuormien siirtymistä varten. Vaakasauvojen väliä ei voitu hyväksyä, vaan projektiot tuli muokata osumaan

toisiinsa, jotta laskentaohjelmalla voidaan suorittaa laskennallista analyysiä. Ilman väliä saadaan seinät toimimaan keskenään ja lattioiden analyttiset tasot saadaan kohtaamaan oikein seinien kuorien liitoskohtaan.



Kuva 9. Analyttiset seinät ovat eri linjoissa.

Analyttisten seinien pinnat toimivat suhteessa toisiinsa tietyllä mallintamishierarkialla. Kun pinnoilla on käytössä alkuperäinen automaattinen liittymistapa, ensimmäiseksi luotu seinä on hierarkiassa ensimmäinen ja muut samaan sarjaan mallinnetut seinät asettuvat tämän mukaan. Jos välissä on mallinnettu toisia seiniä, eri seinätyyppejä tai seinät lähtevät eri tasosta, voi tämä analyttisen seinän sijainnin periytyminen katketa. Tällöin mallissa on useita arvojärjestyksessään ensimmäisiä seinäkuoria, jotka ovat lähtötietona toisille seinäkuorille. Kun jotain yksittäisen seinän analyttistä z-koordinaatin suuntaisen projektion sijaintia muokataan, siirtyy tämä seinä hierarkiassa edelle ja toimii siten pohjatietona muille seinille. Tämän vuoksi muokkaus on hyvä aloittaa alemmista elementeistä niin, että huomioidaan seinälinjojen mahdolliset siirtymät. Huomattavaa seinien projektiossa on se, että automaattisilla asetuksilla voi jäädä runsaasti poikkeamia eri kerrosten välillä, vaikka elementit toistuisivat peräkkäisissä kerroksissa.

Analyttisen seinän ominaisuuksien kautta voidaan hallita seinäosien analyttistä linjausta. Z-projektion linjan muokkauksella saatiin kohdistettua seinälinjat. Z-projektio tuli asettaa keskelle kantavaa rakennetta. Joissain tilanteissa se voidaan asettaa hieman eri linjaan laskennan suorituksen tehostamiseksi tai yksinkertaistuksen vuoksi.

Suurimmat linjojen muutokset kohdistuivat alempiin kerroksiin, joissa tyypillisesti rakenteiden paksuuden ja näin kantavien rakenteiden paksuudet vaihtelevat. Analyyttisten seinien linjaus vaatii siis tilannekohtaisen tarkastelun jokaiselle seinälinjalle.

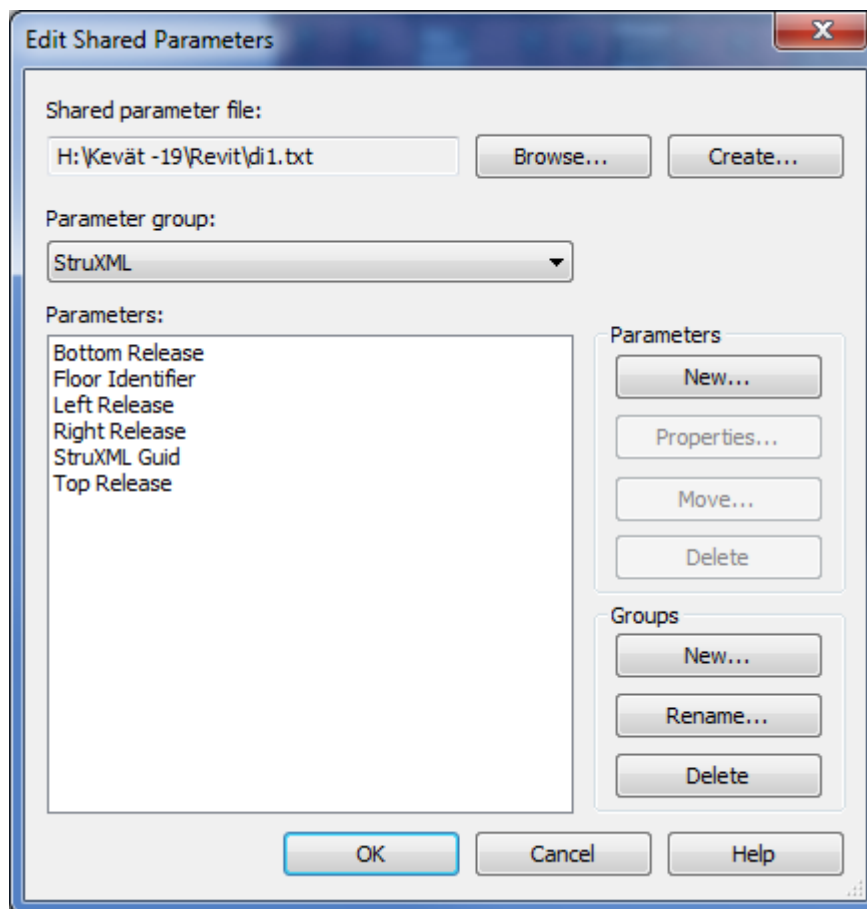
Analyttisen mallin ensimmäisen luonnin yhteydessä havaittiin suuria eroja eri rakennetyyppien analyttisien pintojen muodostumisessa. Seinien pystysuuntainen eli seinän z-projektio asettui keskelle elementtiä, kun projektio halutaan saada keskelle kantavaa rakenneosaa. Väliseinissä tällä ei ole merkitystä, mutta useissa muissa rakennetyypeissä, kuten sandwich-elementeissä, sillä on suuri merkitys. Vaikka projektion asetusta yritettiin muuttaa analyttisen seinän asetuksista elementin keskeltä kantavan rakenteen keskelle, analyttinen kuori ei vaihtanut sijaintia esimerkiksi sandwich-elementeissä. Tämän tiedon avulla huomattiin, että Revitissä elementin ja rakenteen ydin sijoittuivat samalla tavalla, vaikka niiden haluttiin toimivan eri lailla toisistaan. Revitin rakennetyypin määrittämisessä pystyy erikseen rajata rakenteen ytimen, jossa tulisi olla rakennetyypin kantavarakenne analyttisen mallin luonnin kannalta. Aiemmin rakennetyypin rakennekerrokset oli luotu niin, että useampi rakennekerros oli kuulunut rakenteen ytimeen. Ongelma saatiin ratkaistua muuttamalla rakennetyyppien luontitapaa järjestämällä muut kuin kantava rakennekerros ytimen ulkopuolelle. Rakennetyypin muokkauksen ei huomattu vaikuttavan mihinkään muuhun kuin analyttisen pinnan sijoittumiseen, kun rakenteet muodostuivat tietomalliin edelleen oikeanlaisena. Näin ollen voitiin päivittää rakennetyyppien tietoja analyttisen mallin tarpeiden mukaisiksi.

Tietomallivaatimusten takia analyttiset seinät eivät olleet liittyneet toisiinsa heti. Koska jokainen seinä on mallinnettu geometrisesti oikein, myös analyttisten seinien väleissä on sekä pysty- että vaakasaumat. Jos seinien analyttiset pinnat eivät kohtaa pystysuunnassa, aiheutuu laskennassa virheilmoituksia. Vaakasaumat saadaan korjattua samalla tavalla z-projektion linjauksen kanssa, eli analyttisen seinän ominaisuuksien kautta. Seinien yläreunan ja alareunan projektion tunnistus periaatteen (*Top extension method* ja *Base extension method*) muokkauksella saatiin analyttiset seinät kohtaamaan kerrosten välissä olevan välipohjan kuoren kanssa. Suunnittelijan tulee huomioida se, ettei joka seinää voi muokata samalla tavalla, mutta usein yhden kerroksen elementteihin voidaan soveltaa samaa menettelytapaa. Etenkin toistuvissa kerrostalon kerroksissa lähes kaikki yhden kerroksen analyttiset pinnat voitiin muokata kerralla. Kun seinien liitoskohdat tasojen kanssa muokataan nyt kohdalleen, niitä ei tarvitse fyysisesti muokkailla laskentaohjelmassa.

4.1.2 Analyyttisen mallin tiedon lisääminen

Tiedon tarkentamista ja sen tehokasta hyödyntämistä varten Strusoft-lisäosassa on kolme työkalua, joiden avulla voidaan helpottaa mallien välistä tiedonhallintaa sekä vähentää mallinnustyöskentelyä. Kaikki työkalut hyödyntävät Revitissä valmiina olevia ominaisuuksia, jotka on muokattu helpommin käytettäväksi FEM-Designin tiedonsiirtoon. *Wall edge connections*, *Floor identifier* ja *StruXML guid* vaativat toimiakseen *Shared parameters* -tiedoston projektiin. Jokaiselle projektille voi luoda oman tiedostonsa, jonka mukaan tallentuu jokaisella työkalulla tehdyt projektikohtaiset tiedot.

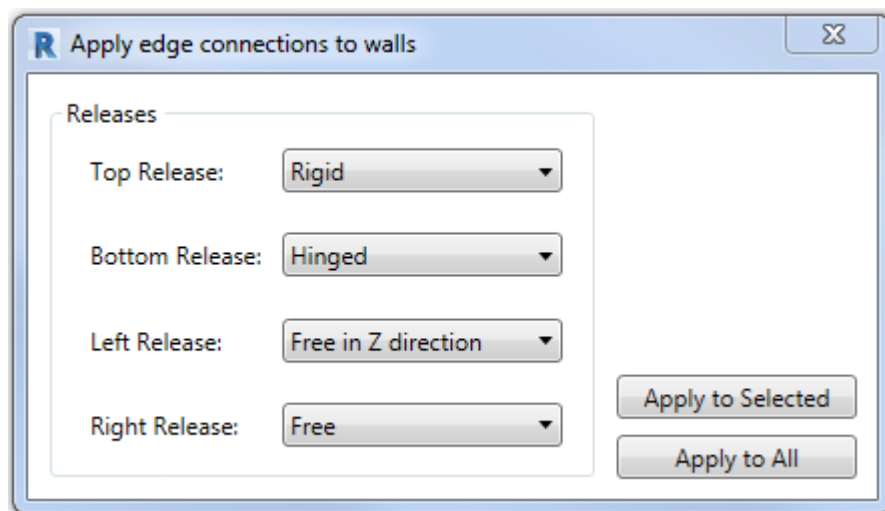
Tiedonsiirrolle tarpeelliset *Shared parameters* eli jaetut parametrit on esitetty kuvassa 10. Nämä parametrit riittävät Revitin projektiin liitettyssä parametrien tiedostossa, jotta tiedon lisäyksen työkalut toimivat. Luotu tiedosto oli helposti linkitettävissä projektiin ja sen tietosisältö tarkasteltavissa kuvan 10 näkymän mukaisesti. Samaa tekstitiedostoa voitiin käyttää suoraan toisessa projektissa, koska jaettujen parametrien tiedosto toimi tiedon luomisen sääntöperusteisena pohjana. Jaettujen parametrien tiedostoon voidaan jatkossa lisätä parametreja tarpeiden näin vaatiessa.



Kuva 10. Shared parameter file -tiedoston sisältö.

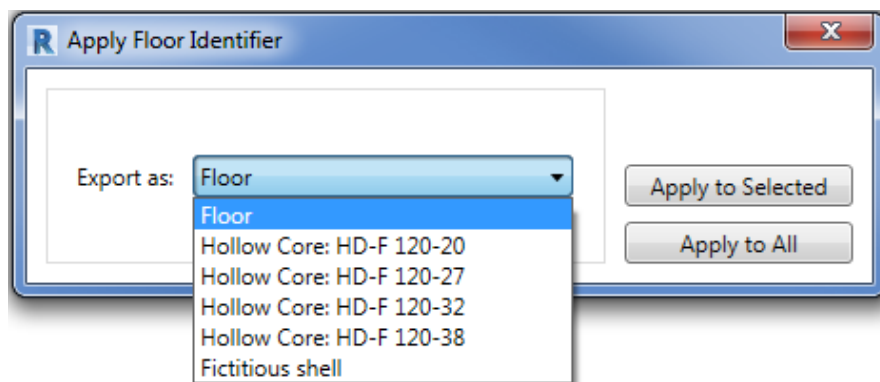
Seinien reunaehtojen lisääminen onnistui lisäosan avulla Revitissä. Sekä vaaka- että pystyliitokset mallintuvat oletusarvoisesti jäykkinä liitoksina. Jotta FEM-Design voi laskea kuormien siirtymät oikeellisesti, tulee seinien ja lattioiden liitoksesta toisen puolen olla nivelelliseksi määritelty liitos ja toisen jäykkäliitos. Tämän takia on järkevämpi määrätä analyyttisille seinille reunaehdot, kun ne voidaan määrittää suoraan työkalun avulla. Vaakatasojen reunaehdoja ei tarvitse muokata, koska oletusarvolla saadaan oikeat reunaehdot lähes koko analyyttiseen malliin. Vaakatasojen reunat tulee määrittää yksi reuna kerrallaan vaakatasojen monimuotoisuuden vuoksi. Tästä syystä vaakatasoille ei yritetty lisätä tarkentavia reunaehdoja Revitissä, kun erikoistilanteet oli helppo toteuttaa FEM-Designissa. Jokaiselle seinälle saatiin aluksi lisättyä reunaehdot Wall edge connection -työkalun avulla yhdellä tyyppiratkaisulla.

Kuvassa 11 on esitettyä työkalun työskentelynäkymä, jolla reunaehtojen lisäys tapahtui. Usein reunaehdoille on järkevää antaa tieto vain yleistettynä jäykkänä tai nivelellisenä liitoksena. Jos jollekin seinälle tiedettiin vaadittavan tässä vaiheessa tiettyjä reunaehdoja, voitiin niitä hieman myös tarkentaa valitsemalla ne erikseen ja päivittää. Reunaehdot kannattaa kuitenkin lisätä ensin jokaiselle seinälle projektissa samalla periaatteella, koska näin saadaan seinien reunaehdot todennäköisemmin lähemmäksi totuutta, vaikka jonkin seinän reunaehdot jäisivät tarkentamatta myöhemmässä vaiheessa. Koska yksittäisten seinien reunaehdoja voi hallita FEM-Designissa paljon tarkemmin, ei reunaehtojen muokkaamiseen Revitissä tule käyttää merkittävästi aikaa. Revitissä voidaan yksinkertaistuksilla luoda hyvä pohja analyyttiseksi malliksi ja FEM-Designin lähtötiedoksi, joten reunaehtojen lisäys projektin seinille voitiin tehdä nopeana toimenpiteenä. Tarkempien liitosten mallinnus on lopulta helpompi toteuttaa FEM-Designissa.



Kuva 11. Seinien reunaehto- ja lisäyksen käytettävän työkalun näkymä, jossa on esitettyinä työkalun tarjoamat vaihtoehdot.

Floor identifier -työkalulla saatiin asetettua vaakatasoille lisätieto siitä, minkälaisena tasona ne siirretään FEM-Designiin. Kuvassa 12 on esitettyinä eri vaihtoehdot vaakatasojen lisätunnisteelle, jonka mukaan ne piirtyvät FEM-Designin puolella. Jokainen lattiatyyppi toimii varsinaisessa laskennassa hieman eri lailla toisistaan. Lattia on oma yhtenäinen lattiakuori, jolla on jonkinlainen Revitistä tuotu paksuus ja materiaali. Ontelolaatta profiilit muodostavat ontelolaattakentän kuorista, jolloin kentässä ontelolaattoilla on jakovälit ja saumat tasossa. Fiktiivinen kuori toimii vain pystysuuntaisia kuormituksia välittävänä tasona eli analyyttisenä pintana, jolla ei ole materiaalitietoja vaan pelkästään tason geometria.



Kuva 12. Vaakatasojen tunnisteen lisäyksen käytettävät vaihtoehdot.

Tehtyjen vertailujen perusteella osoittautui järkeväksi siirtää vaakatasot niin sanottuina lattioina, koska siinä saatiin sisällytettyä materiaali ja kerros paksuus mukaan tietoihin, sekä se toimii valmiiksi laskennassa halutulla tavalla. Ontelolaattoihin ei voitu hyödyntää työkalun ominaisuuksia, koska ontelolaattoja ei ole mallinnettu Revitiin laattatyökaluilla, jolloin niitä ei voi tunnistaa *Floor identifierin* avulla. Ontelolaatat mallinnetaan Revitissä palkkityökalun avulla, jolloin ne on voitu mallintaa tarkemmin ja niiden tietosisältö on saatu paremmalle tasolle. Fiktiivinen kuori osoittautui tarpeelliseksi silloin, kun vaakatasoihin tarvitaan FEM-Designissa laskentaa varten tehtäviä muutoksia, tai kun tasojen käyttäytymisen tietoja ei tarvita. Tällöin on helpompi hyödyntää fiktiivisten tasojen geometriaa lähtötietona FEM-Designissa, koska fiktiiviset tasot piirtyvät FEM-Designissa helposti tunnistettavasti omaan ryhmäänsä. Lähtökohtaisesti lattiana tasojen vieminen oli pääasiallisesti toimivin vaihtoehto, koska silloin rakennuksen tasojen ominaisuudet ovat liitettyinä lattiakuoreessa.

StruXML guidin avulla voidaan identifioida elementtejä ja niiden analyyttisiä pintoja. Tämä työkalu luo jokaiselle rakenneosalle globaalin uniikin tunnisteen, jonka avulla on helpompi löytää ja tunnistaa FEM-Designin puolella oleva elementti Revitistä.

Tunnisteen lisääminen voidaan jättää tekemättä, mutta tunnisteiden lisääminen on nopea toimenpide ja se voi helpottaa ohjelmien välillä työskentelemistä. Esimerkiksi yhden virheellisen analyttisen kuoren päivittämisessä tunnistetta voidaan hyödyntää niin, että ei turhaan luoda koko mallista uutta siirtotiedostoa vaan viedään vain tarpeellinen tiedosto. Ainoastaan ryhmitetyille rakennusosille tunnisteen luonti ei onnistu, kun yhtä samaa tunnistetta yritetään luoda jokaiselle ryhmän osalle. Tästä ei kuitenkaan huomattu olevan haittaa, koska usein ryhmitetyt rakenneosat ovat detalji tason tarkennuksia, eivätkä ole silloin merkityksellisiä koko rakenteen kuormien analysoinnissa.

Ennen rajapinnan tiedonsiirtoa on vielä hyvä varmistaa *Analytical model* ja *Material* -työkalujen avulla, että jokaisessa käytetyssä analyttisen kuoren tai viivan rakenteessa on rakennekerros ja rakennemateriaali määritetty, jotta kaikki rakenteet saadaan suoraan linkitettyä. Tietomallia tutkiessa huomattiin, että useimmissa rakenteissa on rakenteellinen kerros määrättyä hyvin. Se kuitenkin puuttui muutamasta rakenteesta, koska tämän tiedon käyttöä ei ole aiemmin tarvinnut miettiä. Lisäksi tyypillisesti rakennekerroksilla oli periaatteellinen materiaali kunnossa, mutta yleinen määritelmä ei vastaa rakenteellista materiaalia rajapinnalla. Tämä tieto piti tarkentaa useaan rakennetyyppiin. Osassa analyttisistä kuorista ei ollut rakenteellisesta materiaalista mitään määrittystä, joten niitä tuli päivittää yhtä lailla.

Kaikilla Revitissä analyttisen mallin tietoihin tehtävillä muokkauksilla on tarkoituksena vähentää FEM-Designin puolella tehtävää työtä. Analyttisen mallin muokkauksessa Revit on osoittautunut tehokkaaksi työkaluksi, mikä on mallinnustyöskentelyalustalta hieman ennakoitavissa. Analyttisen mallin valmisteluun kannattaa käyttää aikaa Revitin puolella, mutta täysin tarkkaa siitä ei kannata yrittää tehdä. Etenkin kuorien muotoihin, liitoksiin ja sijaintiin on hyvä puuttua tässä vaiheessa. Tärkeintä on korjata analyttisten kuorien sijainnit, sekä saada virheettömästi siirrettyä kaikki kantavien rakenteiden analyttiset osat FEM-Designiin. Silloin voidaan pitää analyttisen mallin tietosisältöä geometrian osalta riittävänä.

4.2 Analyysimallin tiedonsiirto FEM-Designiin

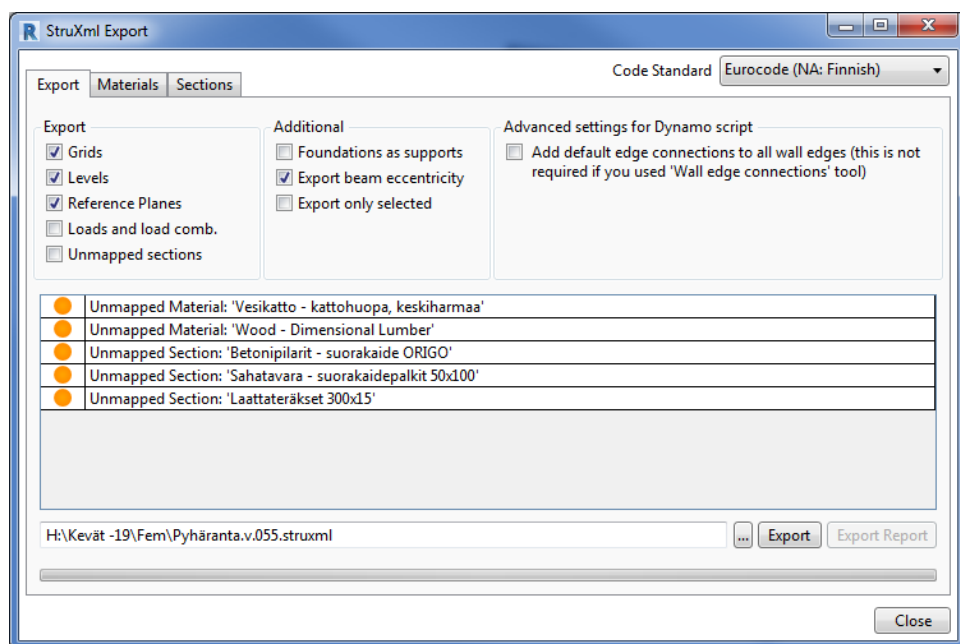
Analyttisen mallin siirrossa FEM-Designiin hyödynnettiin rajapinnan työkaluksi luotua Strusoft StruXML Revit Add-in lisäosan tiedonvientiä. Lisäosan avulla saadaan muunnettua Revitin mallin tieto FEM-Designin luettavaksi struxml-muotoiseksi tiedostoksi. Tätä tiedostoa voitiin käyttää pohjatietona laskennassa analyttisen mallin pohjana. Tiedonsiirron prosessi voitiin jakaa neljään tarkasteltavaan osaan, joista periaatteellisesti kaksi tapahtui Revitin puolella ja yksi FEM-Designin puolella. Revitissä

tehdään tiedonsiirron valmistelu ja suoritetaan tiedonsiirto. FEM-Designissa tehdään tiedonsiirron vastaanotto ja tarkistus, jonka toimesta saatetaan tehdä muutoksia taas Revitissä. Ensin 4.2.1 kerrotaan tiedonsiirtoa varten tehdyt toimenpiteet ja 4.2.2 selitetään tiedonsiirron prosessin havaintoja. FEM-Designin puolen prosessi tiedonsiirrosta on esitetty kohdassa 4.3, jossa on esitetty tiedon vastaanoton ongelmia.

4.2.1 Tiedonsiirron valmistelu

Tiedonsiirtoa ennen päivitettiin rajapinnalle poikkileikkauskirjaston sisältö. FEM-Designin poikkileikkauskirjasto kopioitiin siirtotiedostoksi, joka päivitettiin rajapinnan työkaluun Revitin puolella. Ilman poikkileikkauskirjaston päivitystä täytyi FEM-Designissa muunnella joitain poikkileikkauksia tiedonsiirron jälkeen. Poikkileikkausten päivittäminen ei välttämättä ole pakollinen toimenpide, mutta sen todettiin käytännössä vähentävän virheitä tiedonsiirrosta. Poikkileikkausten päivitys on siis hyvä suorittaa ainakin projektin alussa. Rajapintaa varten valmisteltiin mahdollisimman hyvin analyttisen mallin tietoja.

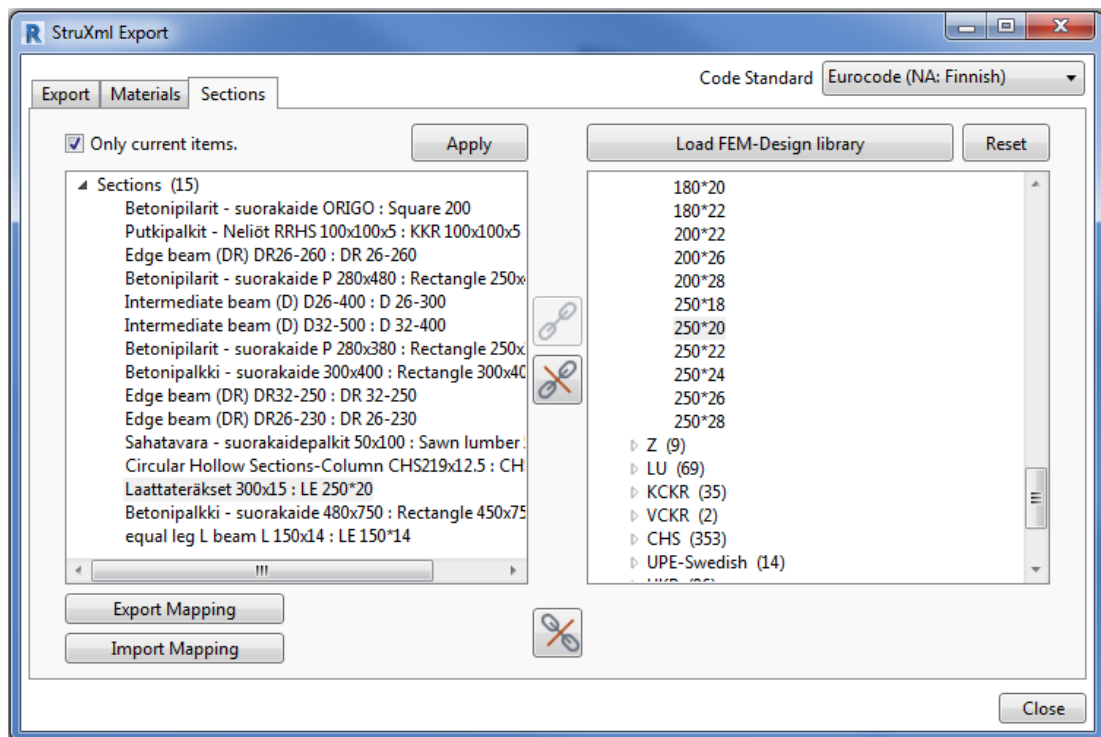
Rajapinnan yli voidaan viedä joko koko malli tai vain valitut osat. Toimivampaa on viedä vain valitut osat, jolloin turhista osista ei muodostu virheilmoituksia tiedonsiirron raporttiin. Tiedonsiirron työskentelyalusta ilmoittaa heti puuttuvista materiaali- ja poikkileikkauslinkityksistä, jolloin niiden päivittämiseen osaa kiinnittää tarvittaessa huomiota. Kuvan 13 tilanteessa voidaan vielä valita rajattu vienti ja perustusten vienti tukiryhminä lisävalinnoista niin haluttaessa. Muilta osin tilanteessa on tarpeelliset valinnat jo tehtynä.



Kuva 13. Tiedonsiirron työskentelyalustan alkunäkymä.

FEM-Designista tuotiin sen tiedonsiirron valmistelua varten viimeisin poikkileikkaus- ja materiaalikirjasto. Kirjaston hakeminen tuli tehdä kappaleen kautta FEM-Designissa, joka oli hieman hankala tapa hakea tieto. Kirjastojen lisääminen Revitin työkalun rajapinnan tiedoksi oli puolestaan suoraviivainen toimenpide. Tiedonsiirto voitiin tehdä ilman kirjastojen päivitystä, mutta silloin tiedon tarkkuus on huonompi. Jos joitain poikkileikkauksia ei löydy, voi kappaleet siirtää toisella poikkileikkauksella ja päivittää heti FEM-Designin puolella. Tällaista toimintamallia on kuitenkin mahdollisuuksien mukaan hyvä välttää, koska virheen riski kasvaa.

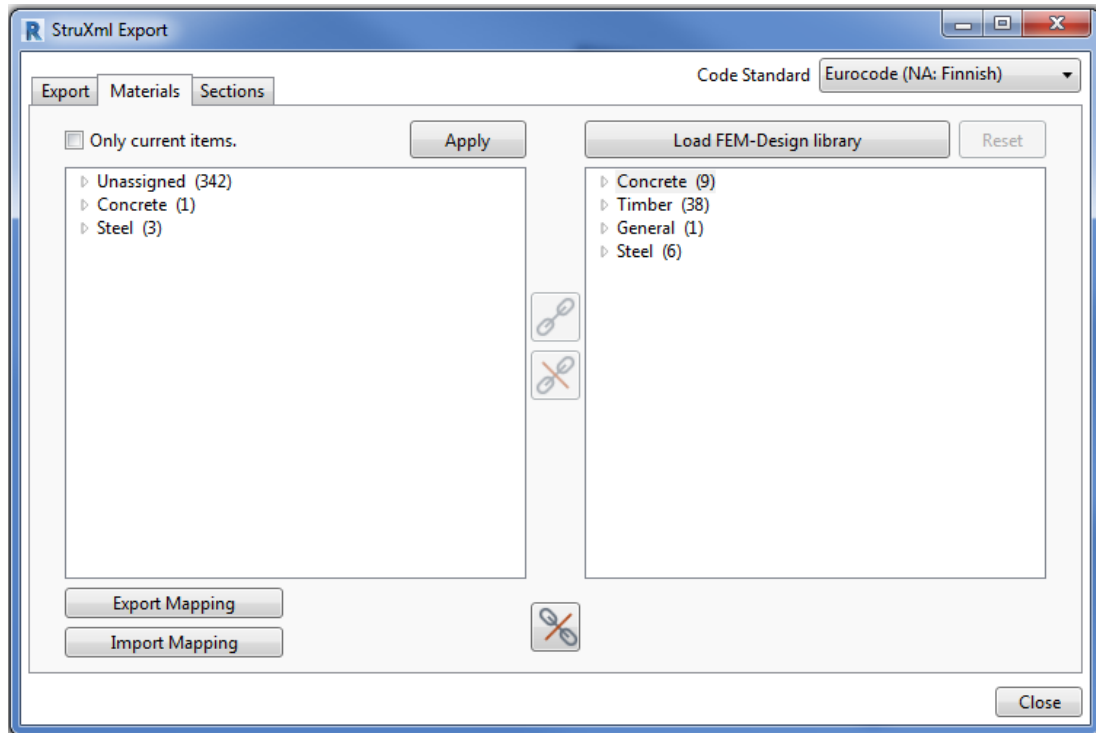
Poikkileikkausten linkityksessä tavoitteena oli saada jokaiselle poikkileikkaukselle oikea vastine FEM-Designin puolelta. Tuodun kirjaston avulla saatiin laajennettua poikkileikkausvalikoimaa jonkin verran. Kuvassa 14 on esitetty tilanne, jossa kaikki tiedonsiirron poikkileikkaukset ovat linkitettyinä.



Kuva 14. Poikkileikkausten linkitys.

Materiaalien linkityksen prosessi vastasi poikkileikkausten linkitystä. Linkityksen työskentelyalusta on esitetty kuvassa 15 ja sen toiminnallisuudet olivat samat kuin poikkileikkausten linkityksessä. Koska rakenteiden materiaalien määrittäminen ei näy suoraan tietomallissa, tulisi materiaalien määrittäminen olla johdonmukaista. Jos materiaalien määrittäminen on tehty sattumanvaraisesti, joutuu rajapintaa varten määrittämään merkittävästi enemmän linkityksiä. Kun materiaalit ovat määritettyinä johdonmukaisesti,

kuvan 15 linkitettävien materiaalien määrä oli 10 tarkentavan *Only current items* -valinnan avulla.



Kuva 15. Materiaalien linkitys

Linkitykseen tulee ylimääräistä työtä, joka voidaan välttää säännöllisellä rakennetyyppien luomisella. Luonnollisesti projektissa voi olla suuri määrä eri rakennemateriaaleja ja lujuuksia. Lisäksi pitää huomioida projektille tärkeiden osien materiaalien linkitys. Tässäkin vaiheessa voitiin jättää pois turhia analyttisiä osia ohittamalla niiden materiaalin linkittäminen, jos niitä vielä karsitulla listalla oli.

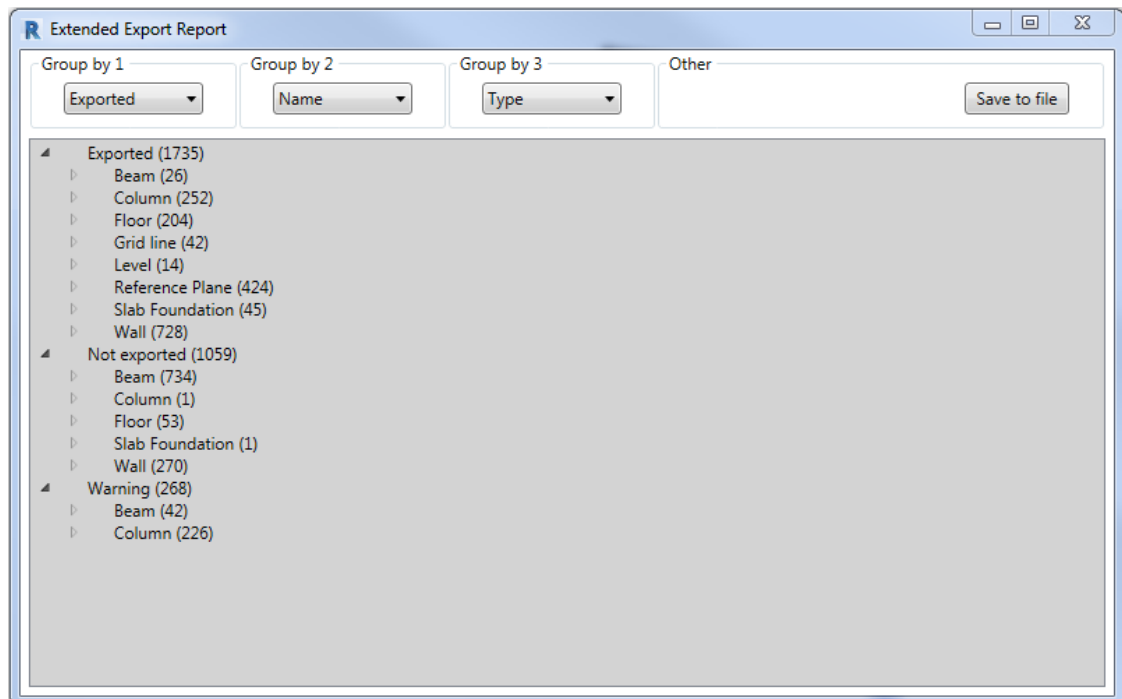
4.2.2 Tiedonsiirto

Tiedonsiirtoon on käytännössä kaksi vaihtoehtoa. Ensimmäinen vaihtoehto on yrittää viedä tietomalli kokonaisuutena, jolloin viennin yhteydessä tulee pidempi raportti, joka sisältää rakennepuhtauskannalta merkityksettömistä osista virhetietoa. Näin toimiessa tulisi analyttisten osien hallinta olla mietitty todella pitkälle ja analyttisiä kuoria sekä viivoja tulisi muodostua vain halutuista osista.

Toinen vaihtoehto on valita vain määrätty osat siirrettäväksi. Yksinkertaisinta on tehdä koko rakennuksesta analyttinen malli, joka sisältää pelkästään tarpeelliset analyttiset osat. Riskinä on, että siirrettävistä osista jää joitain tärkeitä analyttisiä osia. Haittapuoli ilmenee siinä, että grid-linjat jäävät ulos tiedonsiirrosta. Toisaalta hyvin tehdyille analyttisille mallille ei tarvitse tehdä sellaisia muutoksia, joihin tarvitsee grid-linjoja.

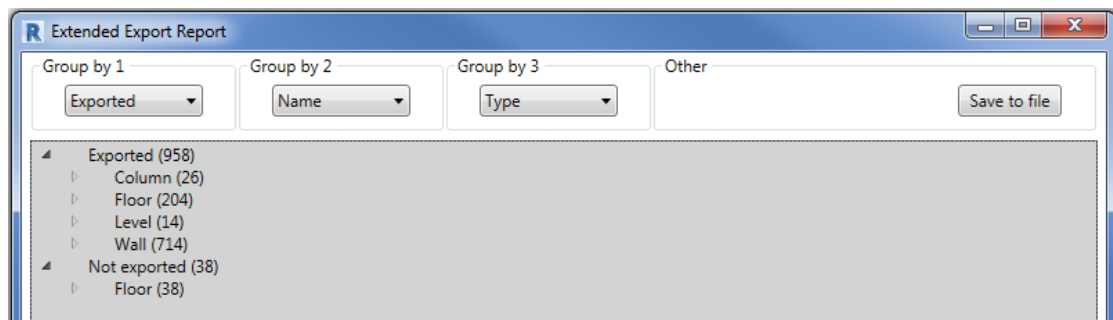
Hyöty tässä vaihtoehdossa on se, että siirrettävä tieto on koko ajan helpommin visualisoitavissa sekä paremmin hallittavissa. Kun analyttinen näkymä on molemmissa työskentelyalustoilla samankaltainen, on muutosten tekeminen sujuvampaa.

Rajapinnalla siirrettävä tieto oli tarkistettavissa tiedonsiirron toteuttamisen jälkeen Export report -toiminnolla. Tällä saatiin tiedonsiirrosta luettava raportti, joka selvensi tiedonsiirron prosessin toimivuutta ilman tiedoston avaamista FEM-Designissa. Kuvassa 16 on esitettyä projektin alkuvaiheen tiedonsiirto. Siitä voidaan huomata, kuinka paljon muokkaamattomalla tiedolla voi aiheutua puutteita tiedonsiirtoon. Lisäksi voitiin jo tässä vaiheessa havaita elementtien määrästä, miksi tiedon kontrollointi ja minimointi on kannattavaa. Jos rajapinnan läpi olisi viety esimerkiksi liitososat ja pienet puupalkit, elementtien ja osien määrä olisi voinut moninkertaistua. Tällä olisi suorat vaikutukset laskennan kestoon ja malli sisältäisi paljon turhaa tietoa. Elementtien ja rakennetyyppien tiedon puutteet estivät usein geometrian siirtämisen FEM-Designin puolelle. Tiedonsiirron raporttia voitiin järjestellä vetovalikoiden avulla suhteellisen helposti, mutta usein raportin tulkinnessa riitti selvittää tiedonsiirrossa epäonnistuneiden kappaleiden tietoja. Varoitus osiossa on esimerkiksi palkkeja, joiden epäkeskisyyden tietoa ei saatu tiedonsiirtoon. Samassa osiossa oli kappaleita, jotka ovat vinossa, joiden tietoja ei ole linkitetty tai tiedot ovat puutteellisia. Eniten varoitusosiossa esiintyi teräsosia. Not exported -osiosta löytyy enimmäkseen osat, joiden analyttinen malli on laitettu pois päältä. Muissa osissa on puuttellisia materiaali- ja poikkileikkaustietoja.



Kuva 16. Tiedonsiirron raportti muokkaamattomasta mallista.

Tiedonsiirron raportin avulla suoritettiin tiedon täydennystä. Virheilmoituksia tuli ensimmäisissä tiedonsiirto yrityksistä etenkin rakenteiden virheellisestä geometriasta, puutteellisesta materiaalitiedosta ja analyyttisen pinnan puutteesta. Raportin avulla täydennettiin entisestään analyyttisten osien tietoja. Vaikka rajapinnan virheistä aiheutuvat toimenpiteet ovat samanlaisia kuin aiemmin mallin tarkistustyökaluilla tehty, kannattaa työkaluja silti käyttää analyyttisen tiedon valmistelevissa toimenpiteissä. *Analytical model* ja *Material* työkalut kuitenkin antavat tiedon huomattavasti selkeämmin luettavassa sekä hallittavassa muodossa ja irrallaan muusta kokonaisuudesta, jos verrataan kuvan 17 tilanteeseen. Rajatun tavan tiedonviennistä tuotettu raportti kuvassa 17 on puolestaan paremmin hallittavissa, jolloin sitä voidaan järkevästi käyttää puutteiden täydentämiseen. Tämä johtuu siitä, että toisen tavan tietomalliin otetaan näkymään vain tarpeelliset analyyttiset osat, joihin voidaan paremmin keskittyä.

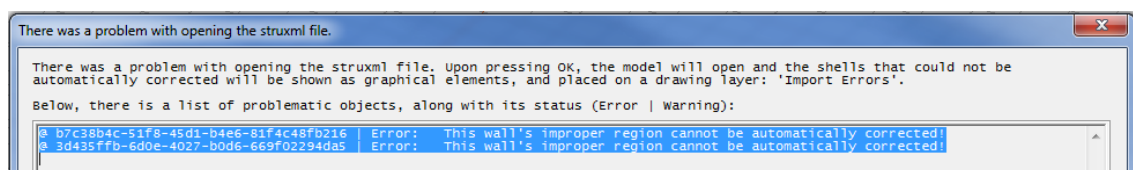


Kuva 17. Tiedonsiirron raportti analyyttisen mallin rajauksen ja korjauksen jälkeen.

Rajapinnan tiedonsiirron raportti antaa hyvän tarkistus mahdollisuuden analyyttisten osien tiedoille, kun tiedon lajittelun avulla tarkistaa virheet raportista. Kun tiedonsiirron raportista oli tehty halutut korjaukset, voitiin aloittaa työskentelyä FEM-Design laskentaohjelmassa.

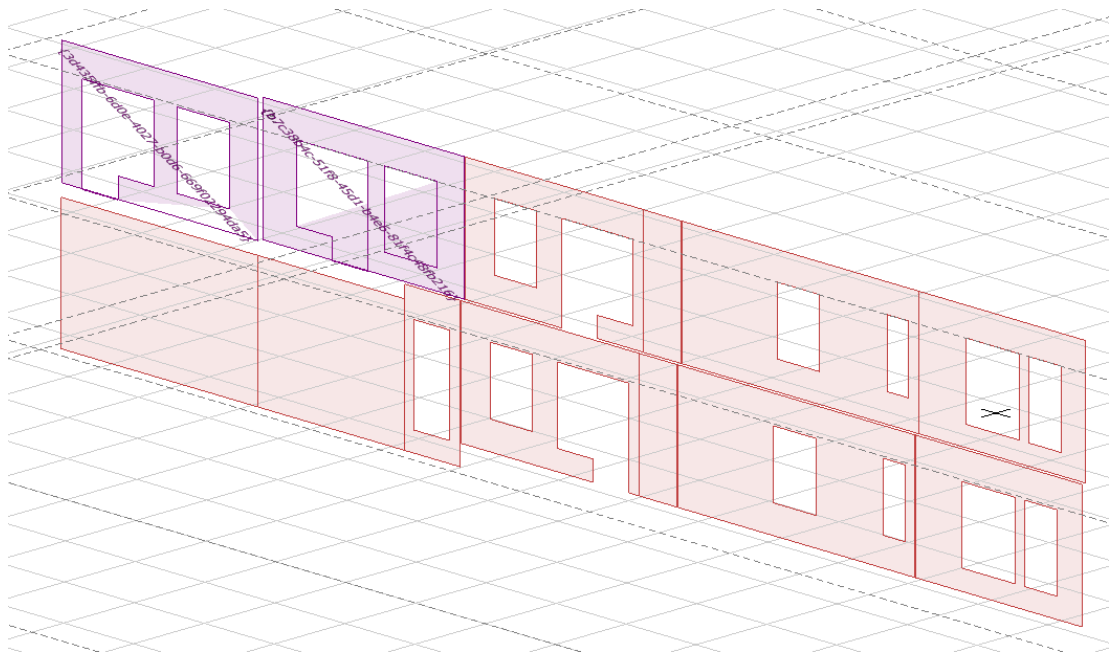
4.3 Analyysimallin käyttöönotto FEM-Designissa

FEM-Designissa uusi projekti aloitettiin tyhjältä pohjalta 3D-structure työskentelymoduulissa. Tähän tuotiin tiedonsiirrossa luotu struxml-tiedosto. Tiedoston avaamisen yhteydessä ohjelma ilmoitti puutteelliset elementit. Kuvan 18 mukaisesti virheelliset kappaleet ilmoitettiin käyttäjälle niille lisätyn tunnisteiden avulla.



Kuva 18. Struxml-tiedoston avaamisen jälkeen tullut virheviesti. Viesti ilmoitti virheelliset elementit tunnisteiden avulla.

Tiedoston avaamisen yhteydessä FEM-Design loi suoraan projektin tietojen mukaiset työskentelytasot ja 3D-näkymän projektista. Näkymien avulla voitiin tunnistaa ongelmallisten elementtien sijainti. Kuvassa 19 on esitetty esimerkki kuori siitä, miltä tiedonsiirron jälkeen näyttää virheellinen elementti, jota ei voida hyödyntää mitenkään FEM-Designissa. FEM-Designissa voidaan eritellä ja esittää näkymästä helposti vain virheelliset elementit, koska ohjelma luo oman ryhmän näille elementeille. Ohjelma ei suoraan kerro, miksi kyseistä elementin kuorta ei voitu piirtää tiedonsiirron jälkeen. Tällaiset elementit tuli itse selvittää ja korjata Revitin tietomallista.



Kuva 19. Tiedonsiirrossa virheelliseksi jääneet kuoret FEM-Designin näkymässä.

Geometrisesti ongelmallisista elementeistä voitiin tunnistaa kaksi tyyppivirhettä, minkä takia ne eivät luoneet kelvollista analyttistä kuorta. Ensimmäinen virhe liittyi aukotusten tarkkuuteen. Jos elementtiin luotu aukko ylittyi muodostetun analyttisen kuoren yli, FEM-Designin ei pysty piirtämään elementtiä. Ongelman lähteenä oli yleensä pieni mallinnusvirhe, jolloin aukko ylittyi hieman myös rakennemallin elementin geometrian yli. Tällainen virhe ei ollut suoraan havaittavissa rakennemallista, koska aukko leikkasi ylimenneeltä osalta tyhjää. Kyseessä saattoi myös olla virheellisesti sijoitettu analyttinen kuori, jolloin aukko ylettyi samoin analyttisen pinnan yli, vaikka se ei ollut väärän kokoinen. Tässä tapauksessa analyttinen kuori ei ollut koko elementin kokoinen, koska se oli rajattu väärin ja siten piirtynyt väärästä kohtaa elementtiä. Analyttisen kuoren sijaintia tuli muokata virheen korjaamiseksi.

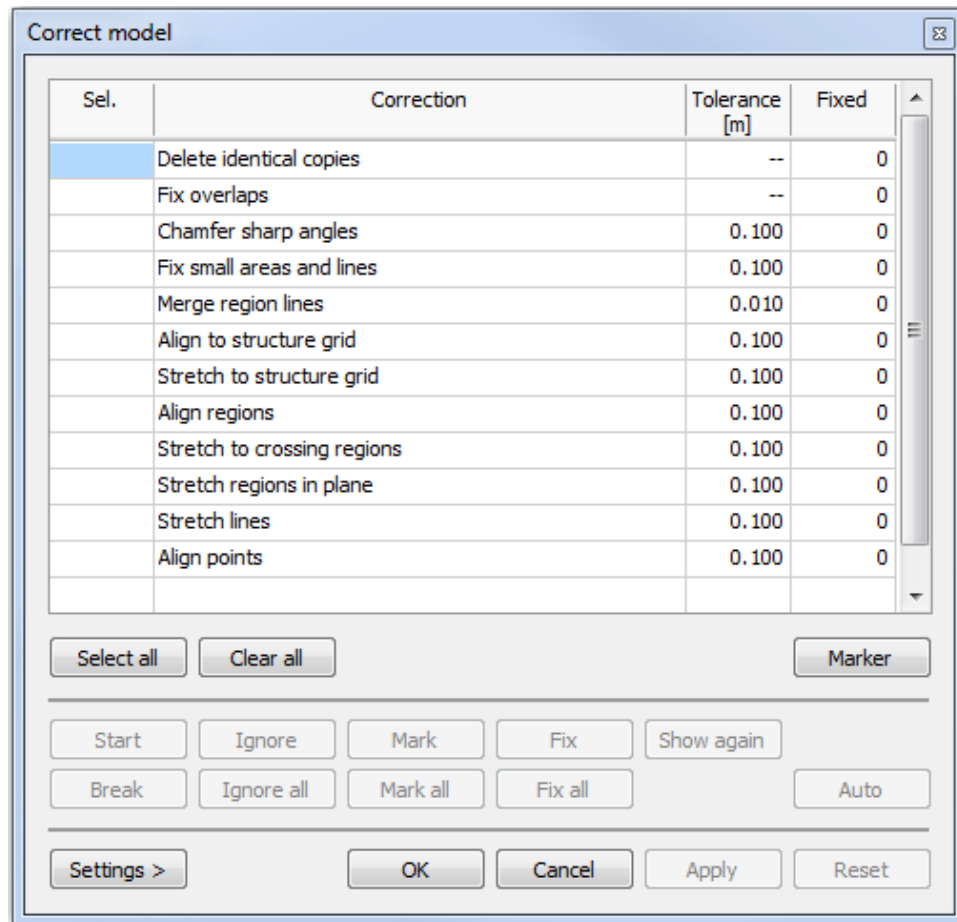
Toinen tyyppivirhe liittyi elementin geometriaan ja aukotuksen toteutukseen. Jos yhteen elementtiin kuului kaksi erillistä osaa, jotka olivat irti toisistaan, aiheutui virhe. Rajapinnalla voidaan hajottaa tällaiset elementit omiksi osiksi laskentaan, mutta se ei onnistu, jos yksi elementti on jaettu erillisiin geometrisiin osiin aukon avulla. FEM-Design yrittää tulkita osat geometrisesti itsenäisinä, mutta virhe aiheutuu, kun niiden tieto on edelleen osittain jaettua. Sama virhe aiheutui myös, kun elementin reunaan jää liian pieni geometrinen kaistale elementistä. Virheiden taustalla oli usein pieni mallinnusvirhe tai kyseisen elementin mallinnusta ei ollut mietitty vielä tarpeeksi pitkälle. Analyysimallin kannalta aukkojen mallintamiseen ja geometrialtaan jakautuviin osiin on kiinnitettävä erityistä huomiota rakennemallia luodessa.

Geometristen virheiden lisäksi tiedonsiirrossa esiintyi ongelmia teräspalkkien profiilien yhteydessä. FEM-Designin puolella ohjelma ilmoitti etenkin Delta-palkkien profiilit virheellisiksi, vaikka niiden profiilitieto on linkitetty päivitetyn kirjaston mukaiseksi. Ongelmaa yritettiin ratkaista poikkileikkaus- ja materiaalilinkitysten korjauksella, mutta virheelle ei löydetty toimivaa ratkaisua. Delta-palkkien mallintaminen FEM-Designin puolella on kuitenkin suhteellisen nopea toimenpide, joten tässä vaiheessa tyydyttiin hyväksymään ongelma, joka voitiin ratkaista lisämallintamisella.

Virheelliset elementit ja analyttiset osat on hyvä korjata heti ja suorittaa tiedonsiirto uudestaan. Itse tiedonsiirto ei vienyt missään vaiheessa merkittävästi aikaa, joten sen käytettävyys osoittautui hyväksi. Tavoitteeksi tiedonsiirrossa on hyvä asettaa virheetön tiedonsiirto, jossa rajapinnan raportti ja FEM-Designin tiedoston avaus eivät anna yhtään virheilmoitusta. Näin saatiin luotua hyvä pohjatiedosto, joka toimii lähtötiedostona laskentamallia päivitettäessä.

Kun siirtotiedosto on saatu onnistuneesti avattua, voitiin analyttinen malli vielä tarkistaa FEM-Designin toiminnallisuuden avulla. Correct model -työkalun avulla tunnistettiin analyttisen mallin ongelmia. Tavoitteena mallin korjaustyökalulla on vähentää mallista kohtia, jotka aiheuttavat ongelmia elementtiverkotuksen luonnille. Kuvassa 20 on esitettynä kaikki mahdolliset kohdat, mitä työkalulla voitiin tehdä. Hyödyllisimmät toiminnot korjaustyökalulla olivat pienten alueiden korjaus, päällekkäisyyksien korjaus, alueiden linjaus ja linjojen yhdistäminen. Venyttämisen toiminnot eivät osoittautuneet hyödyllisiksi tarkistuksen kannalta, koska niiden aiheuttamat muutokset eivät olleet aina järkeviä, joten niitä ei enää uudestaan käytetty. Tehokkainta oli tarkistaa malli heti, kun se avattiin FEM-Designiin ensimmäisen kerran. Kuten kuvassa 20 näkyy, mallin korjaustyökalulla voidaan erikseen merkitä malliin muutosta vaativat kohteet, jotta voidaan itse tulkita korjaustarve. Etenkin päällekkäisyyksien korjaamisessa analyttisten kuorien leikkaaminen meni usein väärin päin automaattisella korjaamisella. Parhaiten

korjaustyökalu toimi silloin, kun sen avulla ensin tunnistettiin virheellisiä kohtia mallista ja tehtiin korjaukset vasta huolellisen tarkastelun jälkeen.



Kuva 20. FEM-Designin Correct model –työkalu. Työkalulla on tarkoitus korjata mallissa esiintyviä pieniä virheitä.

Tiedonsiirrosta on voinut jäädä sivuun elementtejä niiden ongelmallisuuden tai puutteellisen tiedonsiirron valmistelun seurauksena, jotka on kuitenkin saatava laskentaan mukaan. Puuttuvien elementtien lisäykset voitiin suorittaa myöhemmässä vaiheessa joko tuomalla ne rinnakkaistiedostona tai mallintamalla ne erikseen FEM-Designin puolella. Koska rinnakkaistiedoston synkronoinnissa on helppo tehdä virheitä, on parempi mallintaa yksittäisiä elementtejä erikseen. FEM-Designiin mallinnettiin elementeistä lähinnä runsaasti aukotettuja elementtejä, joissa esiintyy tyypillisesti paljon epätarkkuuksia tiedonsiirroissa.

Ulokeparvekkeiden kuormat tuli saada siirtymään kantaville rakenteille lisämallintamisella, koska ne eivät suoralla siirrolla toimineet. Jos ulokeparvekkeita ei huomioitu, aiheutui tuloksiin virheitä ja ulokeparvekkeet eivät kantaneet kuormiaan. Ensimmäinen vaihtoehto oli lisätä parvekeputket, joiden avulla saatiin kuormat siirtymään ja ulokeparvekkeet pysymään mallissa paikallaan. Toisena vaihtoehtona

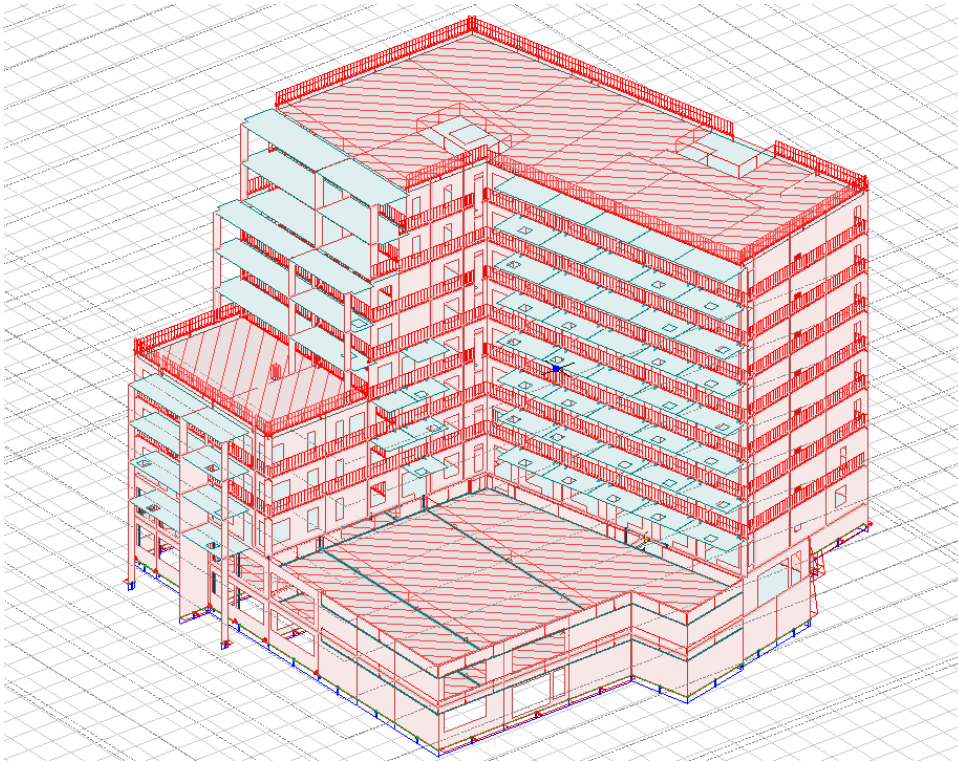
parvekeputkien mallintamiselle on hyödyntää *Line-Connection* –toimintoa, joka on monivaiheisempi tapa ulokeparvekkeiden kuormien siirtoon. Kolmas vaihtoehto oli liittää ulokeparvekkeiden kentät välipohjan kenttään. Line-Connection on vaihtoehtoista tarkin, mutta hankalakäyttöinen. Parvekeputkien lisääminen on nopein tapa. Kenttien liittäminen on antaa kenttien kuormitukselle tarkempia tuloksia, mutta se on myös suhteellisen työläs. Kun parvekeputkien liittämisellä saadaan perustuskuormien tulokset oikeelliseksi helpoiten, on se usein tehokkain tapa ulokeparvekkeiden kuormien hallintaan. Parvekeputkien lisäys tulee tehdä ennen kuormitusten lisäyksiä, kun tiedetään parvekeputkia tarvittavan.

4.4 Kuormitusten ja tukien lisäys

Kuormitukset voitaisiin lisätä jo Revitin puolella, mutta osa rakenteiden omista painoista on lisättävä FEM-Designissa. Rajapinnan läpi tulee vain kantavan rakenteen tiedot, jolloin esimerkiksi sandwich elementtien ulkokuorien painosta ei tule suoraan tietoa FEM-Designiin. Työvaiheiden selkeyttämiseksi kaikki kuormat on parempi lisätä FEM-Designissa. Lisäksi kuormien muokkaamisesta tulee nopeampi toimenpide, kun kaikki kuormat ovat laskentaohjelman puolella, ja siten säästytään ohjelma-alustan ylimääräiseltä vaihtelulta ja tiedonsiirroilta.

Kuormien määrittelyitä varten tuli luoda kuormaryhmät ja yhdistelyt malliin. Kun tämä on kerran tehty huolella, voidaan näitä ryhmiä ja yhdistelyitä käyttää suoraan toisissa projekteissa. Laskentaa varten tulee muistaa valita eurokoodin kansalliseksi liitteeksi Suomen kansallinen liite. Koska ohjelma voi luoda kuormitusyhdistelyt itse, on käyttäjän hyvä isoissa kohteissa huomioida vain tarpeelliset yhdistelyt laskentaan varten.

Osa rakenteiden painoista on lisättävä FEM-Designissa. Kuvassa 21 on lisätty Pyhärannan puuttuvat omat painot laskentamalliin. Koska rajapinnan yli siirtyy tiedot vain kantavien rakenteiden dimensioista, tulee esimerkiksi sandwich-elementtien eriste ja ulkokuoren paino lisätä malliin. Sama tilanne on kaikilla rakennekerroksilla, jotka sisältävät jotain muuta kuin pelkän kantavan rakennekerroksen. Yhtä lailla malliin voidaan lisätä vaakasuuntaisia kuormia manuaalisesti, kuten maanpaine kuormat. Tasoja sekä reunoja hyödyntämällä voitiin vähentää kuormitusten määrittämiseen kuluvaa aikaa.



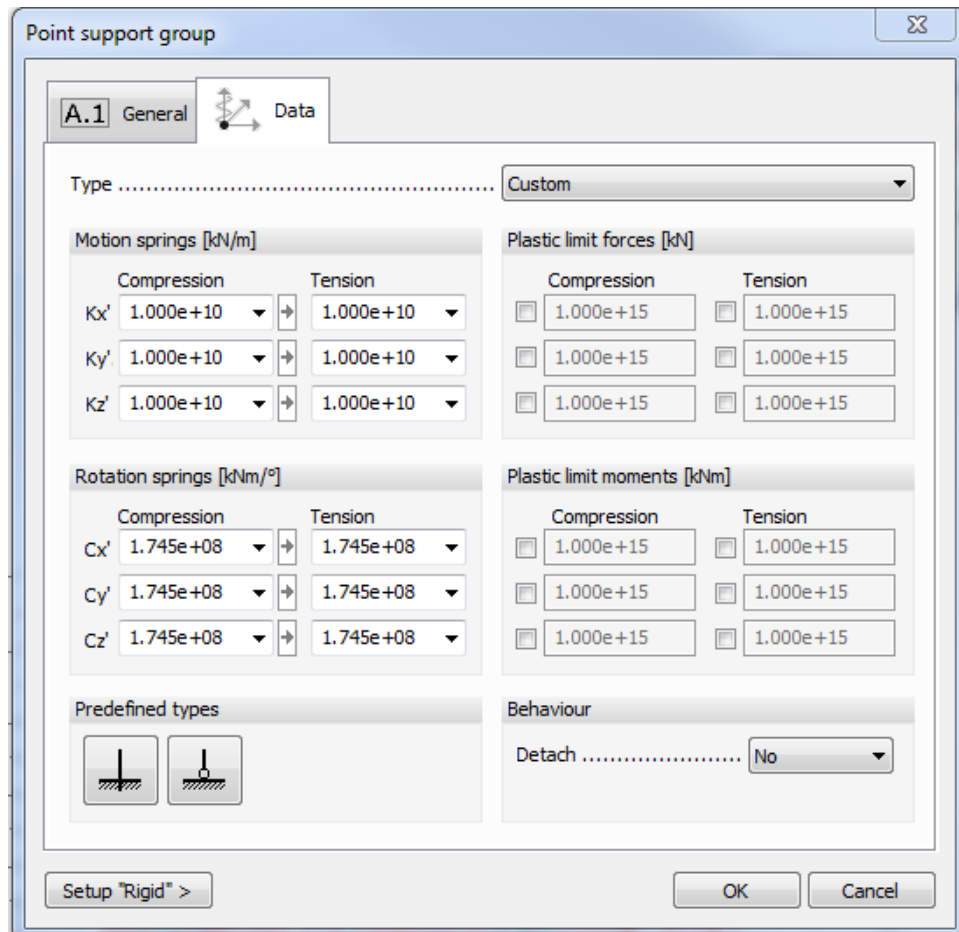
Kuva 21. FEM-Designin kuormitusten havainnointi. Kuvassa malliin on lisättyä rakenteiden omat painot.

Hyötykuormat ja lumikuormat voidaan lisätä suoraan tasojen avulla tason kuormituspinnoilla valitsemalla, tai erikseen tarkemmin piirrettynä käsityönä. Käsityötä kannattaa minimoida, koska kuormitusalueiden määrittäminen viivoja piirtämällä on hidasta. Koska kenttiä ja tasoja voidaan suoraan hyödyntää pystysuuntaisten kuormien määrittämiseen, on kannattavaa tuoda kaikki laatat ja kentät tarkkana. Näin voidaan suoraan hyödyntää kaikki suunnitellut reiät, joiden huomioiminen käsin laskennassa veisi todella paljon aikaa.

Tuulikuormat ja lisävaakavoimat voidaan lisätä FEM-Designin automaattisella määrittelyllä suoraan malliin. Automaattinen lisäys toimii parhaiten, kun rakennuksen seinustat ovat suorissa kulmissa toisiinsa nähden ja seinustat on määritetty ulkopintoina. Monimutkaisissa kohteissa kannattaa lisätä tuulikuormia manuaalisesti laskettujen kuormien mukaisesti.

Tukivaihtoehtoina FEM-Designissa oli kolme päätyyppiä, joista laskentaa varten on käytetty viivatukia ja pistetukia ryhminä. Laskenta vaatii aina jonkinlaisen tukirakenteen kaikkien alimmaisten kuorien alle, jotta laskenta saadaan ajettua oikeellisesti läpi. Jos joltain elementiltä on jäänyt tuki laittamasta, ilmoittaa ohjelma laskennan yhteydessä virheestä, joka ilmenee joko varoituksena suurista siirtymistä tuloksissa tai laskennan keskeytymisenä.

Pistetuet mallinnettiin pistetukiryhmänä, jotta niiden muokkaamisesta voitiin käsitellä tilanne kohtaisesti. Kuvan 22 näkymän avulla voidaan määrittää tukiehdot käytetylle pistetuella. Jotta ohjelma antaa oikeellisia tuloksia, tulee tuen olla määritettynä niin, että se vastaa esimerkiksi pilarin päädylle asetettuja vapausehtoja. Jos tukiryhmän toiminta on ristiriidassa siihen liitetyn kappaleen kanssa, tulosten virheellisyys kasvaa. Vastaavanlaisilla asetuksilla voitiin määrittää myös pistetukilinjat, joiden määrittämisessä on otettava huomioon samalla tavalla esimerkiksi seinäelementin alareunan reunaehdot.



Kuva 22. Pistetukiryhmän määrittäminen. Esitettynä esimäärätty jäykkätuki.

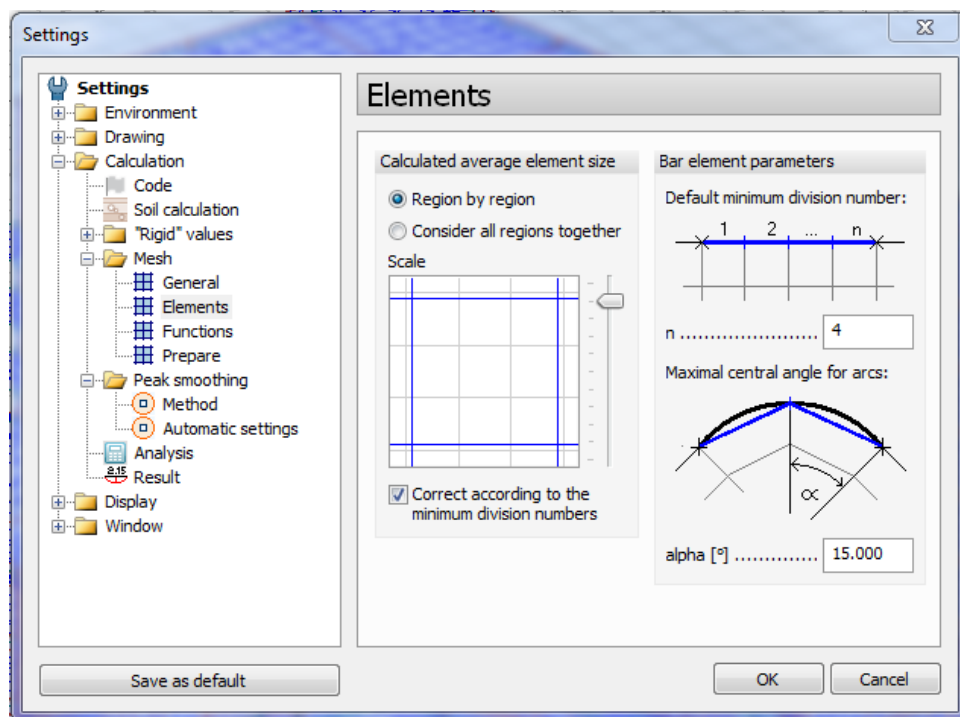
Tukiehtoja voidaan hallita joko koko projektista ryhmissä tai myös erikseen. Tästä syystä voitiin luoda ensin hyvällä yleisperusehdolla tukimäärittäykset projektiin ja tarkentaa niitä siinä vaiheessa, kun laskentamalli on saatu laskenta valmiuteen.

4.5 Mallin elementtiverkotus ja laskenta

Elementointi aloitettiin asetusten tarkastamisella. Kun asetuksen on säädetty, voidaan testata verkotuksen toimivuutta. Ensimmäiseksi laskentamalli verkotettiin täysin automaattisesti harvalla verkotuksella. Harvalla verkotuksella voidaan tarkistaa tuotetun laskentamallin soveltuvuutta elementtiverkotukseen. Ongelmia saatiin esille joko

luomalla verkotusta tai yrittämällä ajaa laskentaa. Vaikka laskentamallille olisi tehty kaikki edellisissä luvuissa mainitut korjaukset onnistuneesti, voi verkotuksen elementoinnissa ilmentyä pieniä virheitä. Virheet korjataan lähinnä verkotuksen muokkaamisella ongelmakohtien läheisyydestä.

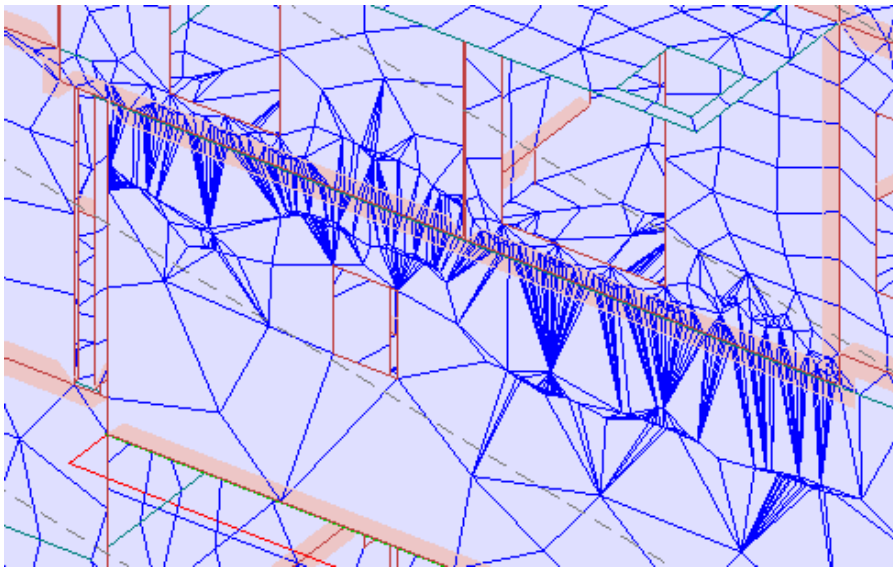
Elementointiin liittyviä asetuksia on esitettyä kuvassa 23. Tärkein hyödynnettävä asetus on verkotuksen tiheyteen liittyvät asetukset *Calculated average element size*. Tämän avulla voidaan hallita elementtiverkotuksen pääpiirteistä muodostumista. Koska tarkempi ja tiheämpi verkko lisää merkittävästi laskenta aikaa, ei kannata heti luoda tiheintä mahdollista verkotusta. Lisäksi alueet on hyvä luoda erikseen, koska mallissa on useita liitoskohtia, joihin liittyy monia eri elementtipintoja. Tämä voi helposti monimutkaistaa verkotusta, ja siten aiheuttaa turhia ongelmia laskennassa. Vaikka verkotus luodaan alue kerrallaan, huomioi verkotus viereiset alueet yhtenäistään verkotusta liitosalueilla. Näin toimittaessa automaattinen verkotus huomioi vain tarpeellisissa määrin viereisiä verkotuksia. Silti monimuotoisiin ja epäsymmetrisiin liitoskohtiin saattoi muodostua liian tiheä elementtiverkko, jota jouduttiin paikoitellen korjaamaan manuaalisesti.



Kuva 23. Elementointi verkotuksen asetuksia.

Suurin osa elementoinnin verkotuksen virheilmoituksista koskivat lähinnä laskentaan sopimattomia elementtejä, jotka ilmenivät laskentaa ajettaessa. Joihinkin kohtiin automaattinen elementtiverkotus oli tehnyt liian tiheää verkkoa, jolloin reunoille oli saattanut jäädä lähes nollamittaisia elementtejä. Usein tällaiset kohdat olivat

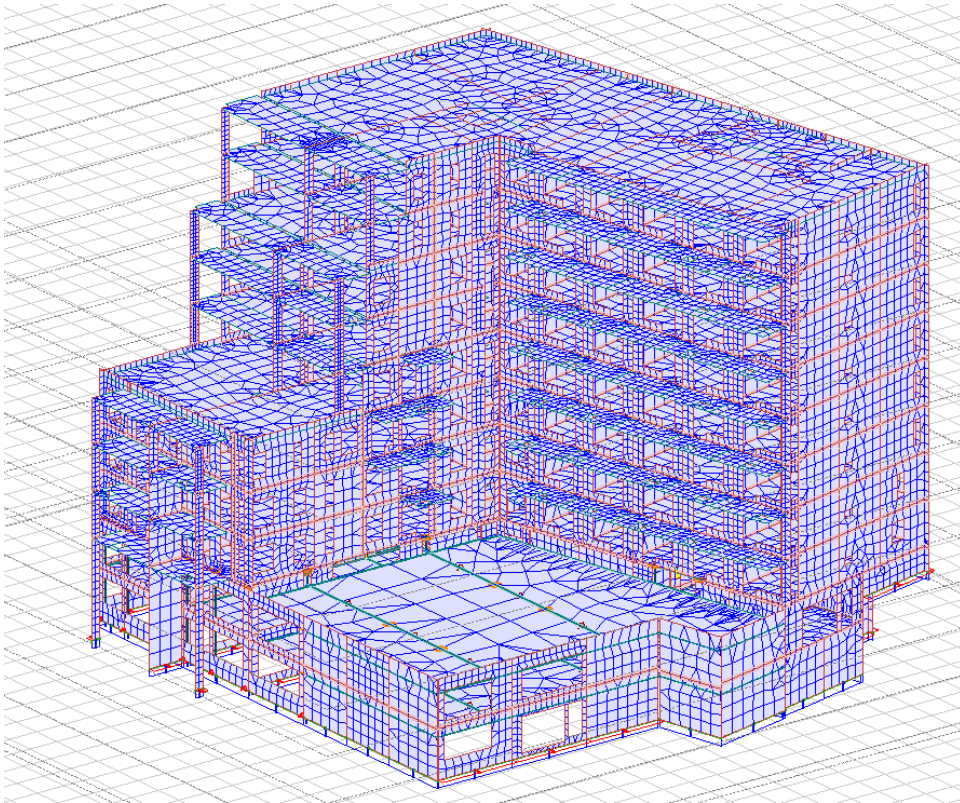
verkotukseltaan laskennalle turhan monimutkaisia, jolloin verkotusta oli järkevää muuttaa. Verkotuksen monimutkaisuuden aiheuttajana toimi usein pienet geometrian päällekkäisyydet, joissa esimerkiksi seinän pääty tuli hieman alempaa seinää pidemmälle. Tällöin seinien väliseen tasoon saattoi muodostua tiheää verkotusta. Geometrian puolesta nollamittaisia elementtejä muodostui tasojen ja seinien liitoksiin sellaisissa kohdissa, joissa seinälinja kääntyi vinoon kulmaan suhteessa muihin tasoon liittyvien seinien kanssa. Esimerkiksi kuvassa 24 aiheutuu virheellistä elementtiverkotusta siitä syystä, että monimuotoiset seinät kohtaavat tason geometrian kanssa huonosti. Näin ollen seinä - seinä liitoksen ja seinä - lattia liitoksen väliin jää pieni väli, jolloin verkotuksen luonti monimutkaistuu huomattavasti. Tällaisiin kohtiin on hyvä soveltaa yksinkertaistuksia, jos laskennan tavoitteisiin sillä ei ole vaikutusta.



Kuva 24. Elementtiverkotuksen tihentymistä ongelmakohdassa.

Moni geometrinen ongelma voi estää koko elementtiverkotuksen luonnin. Esimerkiksi päällekkäiset geometriat ja elementtien kopiot toisistaan estävät geometrian luonnin. Useimmat geometriset ongelmat olivat korjattavissa, kun käytettiin *Correct model* -työkalua. Hankalin ongelma muodostui vinon geometrian kanssa, vaikka vinous tapahtui vain yhdessä tasossa. Lattian ja seinien vinosta liitoksesta saattaa tulla ohjelmalla turhan monimutkikas, jolloin FEM-Design ilmoittaa, ettei elementtiverkotusta saada luotua. Tästä ongelmasta oli haastavaa päästä eroon, mutta lopulta ainoa vaihtoehto oli liitoksen yksinkertaistaminen muuttamalla liitoskohtaan tulevien osien määrää esimerkiksi muokkaamalla seinien pituuksia. Koska ongelma esiintyi vain yhdessä tietyssä kohdassa, voitiin ongelma ratkaista suhteellisen pienellä työllä. Ongelman taustalla oli pieni geometrinen eroavaisuus liitokseen osallistuvilla kuorilla, jolloin taso liittyi hieman liitoskohdan viereen. Virheen muokkaus oli helpoin toteuttaa FEM-Designissa, mutta geometrisen virhe olisi voitu poistaa Revitin mallin tarkentamisella.

Lopulta saatiin elementtiverkko koko rakennukselle, jolloin voitiin testata laskennan toimintaa. Kuvassa 25 on esitettyä laskennassa toimiva laskentaverkko, jota on tarkennettu manuaalisesti vain muutamasta ongelmallisesta liitoksesta. Vaikka asetukset ovat periaatteessa samat jokaiselle mallin rakenneosalle, muodostuu malliin monen kokoista verkotusta. Laskennan ajamiseen voidaan valita eri tarkistelu tapoja. Ohjelmassa on laskennan suoritukseen valittavissa kaikki kuormitusyhdistelmät, jolloin ohjelma antaa automaattisesti maksimi- ja minimitulokset kaikista kuormitustilanteista vertailtuna. Näistä voitiin valita tulosten kannalta kiinnostavalle tilanteelle oleelliset laskennat tai suorittaa kaikki kerralla. Jokainen kuormitustilanne voidaan laskea erikseen, jos halutaan suoriutua laskennasta nopeammin. Laskentatulokset olivat myös tarkasteltavissa erikseen, kun ajettiin kaikki kuormitusyhdistelmät yhdellä kertaa läpi. Onnistunut laskenta vaatii toimivan elementtiverkon, kuormitusmääritelmät, laskettavissa olevan rakennuksen sekä tukiehdot.



Kuva 25. Elementtiverkotettu FEM-designin malli.

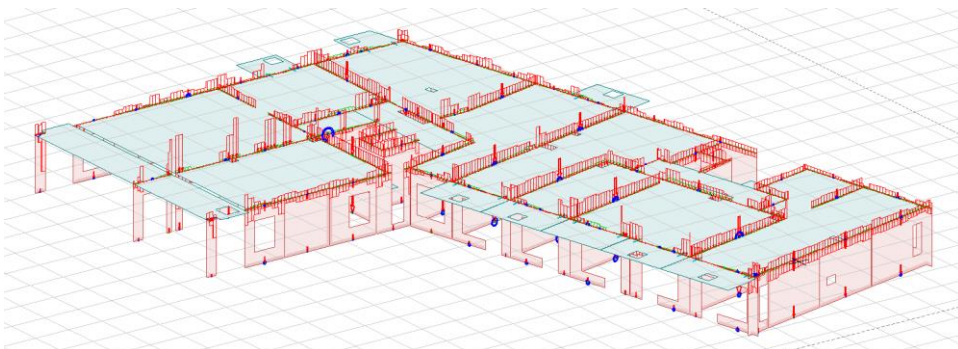
Laskennassa esiintyvät ongelmat liittyivät virheelliseen kuormituksen mallintamiseen tai virheelliseen elementtiverkotukseen. Jos elementtiverkotuksen takia muokattiin mallia, niin silloin on riskinä se, että kuormitus ei enää sovi yhteen tason kanssa. Silloin mallissa on esimerkiksi kuormaa tyhjän päällä, joten kuorma tulee muokata uudestaan muokattujen tasojen mukaiseksi. Kuormitusten aiheuttamat ongelmat aiheutuivat lähinnä tasojen muokkauksesta, kun kuormituksia ei huomattu muokata samanaikaisesti.

Laskennan virheetön ajo onnistui, kun elementtiverkotuksesta saatiin luotua virheetön versio. Epätarkalla eli harvimmalla mahdollisella elementoinnilla voitiin testata mallin toimintaa suhteessa kuormituksiin. Näin voitiin tarkastaa mallin oikeellinen toiminta, ja tunnistaa kuormituksen suhteen ongelmalliseksi muodostuvia kohtia virheilmoitusten avulla. Lyhyen laskenta-ajan vuoksi kannatti testata laskentamallin toimivuutta siis harvalla verkotuksella. Siirryttäessä tarkempaan laskentaan tuli elementtiverkotus tarkastaa uudelleen, koska verkotuksen tarkentaminen voi toistaa uudelleen virheitä. Tarkemmalla verkotuksella on samankaltaiset virhetypit ja ongelmapaikat kuin harvemmalla verkotuksella, jolloin elementtiverkotus voitiin tarkistaa ja korjata valmiiksi nopeammin jo tunnetuista ongelmakohdista. Jos laskentamallin muodonmuutokset tapahtuvat tuloksissa pääasiassa oletetuilla tavoilla, voidaan todeta laskentamallin toimivan.

4.6 Tulosten vertailu käsinlaskentaan

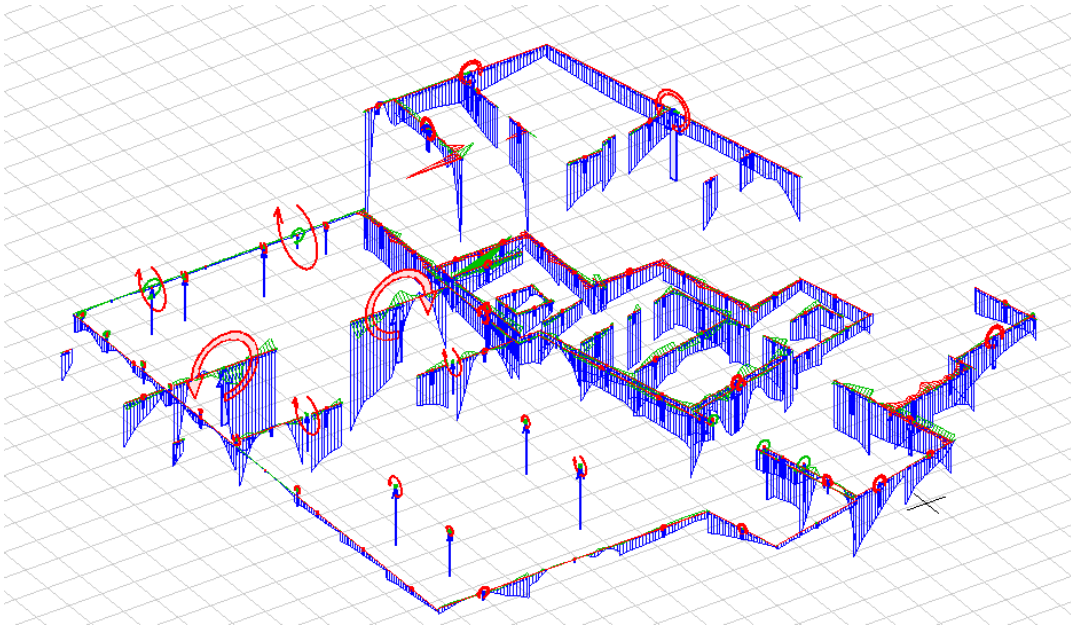
Oletusarvona laskentatuloksille oli, että tuloksista saadaan luettua tarkempia tuloksia pienemmällä vaivalla verrattuna käsinlaskennan kuormituksiin. Vertailuun otettiin perustuskuormien käsinlaskennan tulokset. Suoritetussa käsinlaskennassa oli korostunut se, että kohteen perustuskuormien laskenta oli haasteellista. Erityyppisiä seinälinjoja ja rakenteiden vaihteluita rakennuksessa oli runsaasti, jolloin käsin laskennassa jouduttiin tarkastelemaan jokainen kantava linja tarkemmin.

Tulosten tulkintaa ja tarkastelua varten FEM-Designista saadaan laskentamalliin sijoittuvat lasketut kuormitukset ja reaktiot. Kuormituksia voitiin tarkastella joko erilaisten 3D-näkymien avulla, rakenneosien eriteltyinä 2D-näkyminä tai erikseen käsiteltynä tulospöytäkuva. Kuvassa 26 näkyy Pyhärannan 4. ja 5. kerroksen liitosvoimat. Liitosvoimien avulla voitiin tarkastella kuormituksen siirtymistä ja kertymistä kerrosten välillä ja tarkastella kuormituksen oikeellisuutta. Etenkin yksinkertaisen seinälinjan tai toistuvien seinäelementtien kohdalla voitiin todeta kuormituksen kasvavan oikealla tavalla.



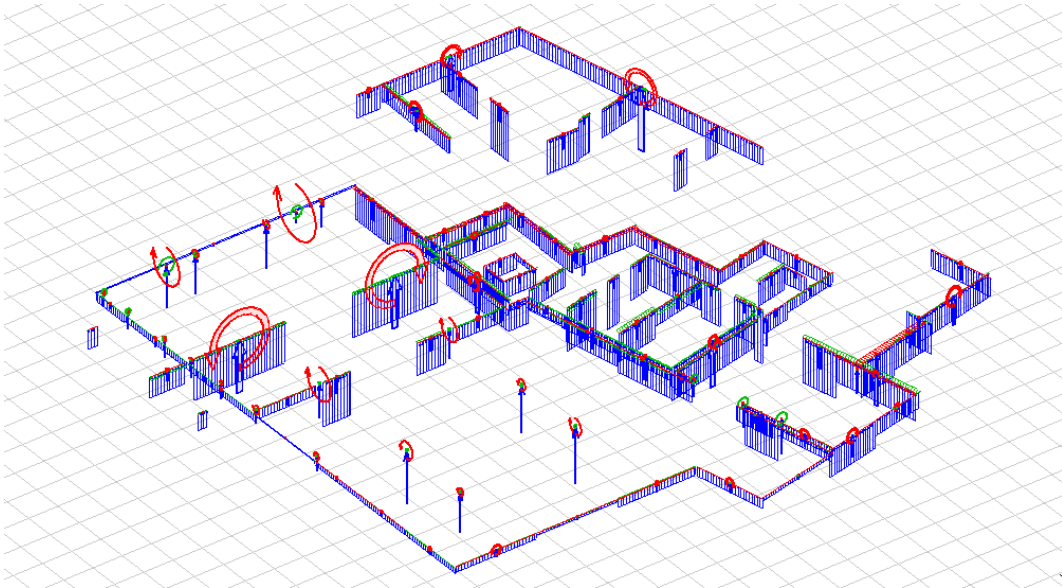
Kuva 26. Liitoskohtien voimia.

Laskennan tuloksia tarkasteltiin ensisijaisesti 3D-näkymän avulla, koska se osoittautui tehokkaimmaksi ja havainnolliseksi tavaksi. Kuvassa 27 on esitettyä laskennan tarkat elementtien tulokset. Laskentatuloksissa korostuvat nurkka-alueiden jännityspiikit, kun elementtiverkotuksen elementtien reunoilla on eri tulokset. Näkymä korostaa hyvin kuormitusten aiheuttamaa kuviota, jonka avulla voidaan tulkita sitä, onko kuormituksia muodostunut oikealla tavalla perustoille. Tämän avulla voidaan huomata mahdollisia mallinnusvirheitä, joiden takia esimerkiksi jokin seinälinja kantaa ylimääräisiä kuormia.



Kuva 27. Laskennan mukaiset tarkat tulokset. Jännityspiikit korostuvat tukien kulmissa.

Kuvassa 28 on esitettyjä laskennan tuloksia, joita voidaan verrata paremmin käsin laskennan tuloksiin. Tässä jännityspiikit ovat tasattu, koska nurkkien jännitykset tulisivat todellisessakin tilanteessa tasaantumaan seinälle. Tasaantumisen leveyttä voidaan säätää elementtien leveyden ja verkotuksen leveyden välillä, jolloin on helpommin nähtävissä kuormien kertyminen.



Kuva 28. Laskennan tulokset tasattuina.

Taulukossa 1 on vertailtuna käsinlaskennan ja FEM-Designilla suoritettujen perustuskuormien laskennan tuloksia. Tulosten eroavaisuutta on havainnollistettu esittämällä FEM-Designin tulosten prosentuaalinen osuus käsinlaskennan tuloksista. Parkkihallin tuloksissa on parkkihallin osuuden pilareiden kuormia, jotka olivat pääasiassa yksinkertaisten rakenteiden kohdilla. Näissä rakenteissa oli vähän aukotusta, jolloin tulokset ovat lähellä käsinlaskennasta saatuja arvoja. Kerrostalon osa 1 sisältää parkkihallin päällä olevan kerrostalon osan aiheuttamia kuormia 4-kerroksiselta ja 8-kerroksiselta osuudelta kerrostaloa. Aukotuksen vaikutus näkyy selvemmin. Lisäksi kuormien siirtyminen on osittain toiminut FEM-Designissa eri tavalla kuin on oletettu, jolloin osa saaduista tuloksista on huomattavasti muita lähempänä käsinlaskennan tulosta. Kerrostalon osa 2 sisältää 8-kerroksisen kerrostalon loppuosan seinien kuormituksia, joko sisältää huomattavasti aukotuksia elementeissä. Seinälinjat eivät useissa kohdissa ole jatkuvia, vaan kerrosten välillä tapahtuu jonkin verran vaihteluita. Pääasiassa tulokset ovat pienempiä aukotuksen takia. Seinälinjoilla 7 ja 9 on huomattava kasvu kuormituksesta. Tarkemmin tarkasteltuna on todettu, että tasojen kuormien jakautuminen on toiminut laskentamallissa eri tavalla kuin on oletettu. Samalla huomattiin FEM-Designin kuormituksen jakautuvan yleisesti hieman tasaisemmin kuin käsinlaskennan perusteella on saatu. Tämä johtuu siitä, että FEM-Designin laskentamalli on siirtymäperusteinen, jolloin rakenneosat ovat jakaneet kuormitusta siirtymäerojen vuoksi.

	Käsinlaskenta	FEM-Design	Ero FEM/KL
Parkkihalli			
Pilari 1 (kN)	660	626	94,85 %
Pilari 2 (kN)	1550	1394	89,94 %
Pilari 3 (kN)	1511	1341	88,75 %

Pilari 4 (kN)	1826	1834	100,44 %
Kerrostalo osa 1			
Seinälinja 1 (kN/m)	5713	5070	88,74 %
Seinälinja 2 (kN/m)	916	690	75,33 %
Seinälinja 3 (kN/m)	2286	1700	74,37 %
Seinälinja 4 (kN/m)	754	734	97,35 %
Kerrostalo osa 2			
Seinälinja 5 (kN/m)	525	501	95,43 %
Seinälinja 6 (kN/m)	481	428	88,98 %
Seinälinja 7 (kN/m)	229	253	110,48 %
Seinälinja 8 (kN/m)	593	430	72,51 %
Seinälinja 9 (kN/m)	481	525	109,15 %
Seinälinja 10 (kN/m)	993	750	75,53 %
Seinälinja 11 (kN/m)	1088	840	77,21 %
Seinälinja 12 (kN/m)	1163	763	65,61 %

Taulukko 1. Käsinlaskennan ja FEM-Designin rakenneanalyysin tulosten vertailua.

Käsinlaskentaan vertailussa voitiin huomata selviä eroja. Vaikka suuruusluokka on osittain samankaltainen ja todellisen mukainen, saadaan FEM-Designilla laskettuna pienempiä kuormia. Tämä johtuu suurimmaksi osaksi siitä, että käsin laskennassa ei ole huomioitu seinien ja välipohjan aukotuksia, kun niiden kuormitus on laskettuna varmalle puolelle. Lisäksi käsinlaskennassa on tehty varman puolen oletuksia, kun kuormien siirtymiset ovat olleet haasteellisia, eikä käsinlaskennassa saada huomioitua siirtymien vaikutusta kuormituksiin. FEM-Designin laskenta huomioi aukot suoraan rakenteiden kuormiin ilman lisätoimenpiteitä. Aukotuksen tarkka huomiointi käsin laskennassa hidastaisi monimutkaisessa kohteessa laskentaa entisestään. Perustuskuormia laskettaessa on kuitenkin hyvä huomioida se, että kyseessä on rakennuksen tärkein rakenne, jonka tulee kestää koko rakennukseen kohdistuvat erilaiset kuormitukset. Perustusrakenteiden liian tarkka mitoittaminen ei ole rakennuksen elinkaarta ajatellen järkevää. Tärkein hyöty FEM-laskennassa saadaan siinä, että rakennesuunnittelijan aikaa ei kulu turhan paljoa käsin laskennassa, kun tulokset voidaan saada luotettavasti laskentaohjelmilla.

5. CASE-KOHTEEN TULOSTEN ARVIOINTI

Revitin analyyttisen mallin luonnille tai hyödyntämiselle ei ollut työn aluksi käytäntöjä ja rajapinnalla ei ollut toimivaa tiedonsiirtoa. Tavoitteena oli luoda rajapinnalle toimiva prosessi, jonka avulla voidaan esittää tietomallin hyödyntämistä helposti ymmärrettävässä ja käytettävässä muodossa. Rakennesuunnittelijan ei välttämättä tarvitse ymmärtää rajapinnan ja tietomallin toimintaa täysin, vaan rakennesuunnittelija voi keskittyä rakennemallin luontiin ja rakennesuunnittelun ongelmiin.

Toimiva tietomallin hyödyntämisen prosessi alkaa projektin analyyttisen mallin esiin tuonnilla tehdystä rakennemallista. Analyyttisen mallin osat tarkistetaan, jotta siirtyvä tieto on oikeellista. Tämän jälkeen ajan tasalla olevalla rajapinnan työkalulla siirretään tarvittavat analyyttiset pinnat laskentaohjelmaan, johon avataan laskentamalli projektista. Laskentamalliin lisätään tarvittavat kuormitukset ja tukiryhmät. Laskentamallille luodaan elementtiverkotus ja lasketaan tarvittavat laskennat läpi. Prosessi päättyy laskentatulosten tarkasteluun.

Suurin osa tiedonsiirrosta kohdatuista ongelmista oli ratkaistavissa johdonmukaisilla tiedonpäivityksillä. Suurin päivitys koski rakennetyyppien luontityyliä, kun analyyttisen kuoren sijaintia haluttiin kontrolloida selkeämmin ja laskentaperiaatteiden tavoilla. Kun kaikki rakennetyypit päivitettiin, niin materiaalitieto tulee valmiiksi oikein myös analyyttisen mallin ja rajapinnan vaatimusten mukaan. Rakennuksen rakennemallin luontiin päivitykset eivät varsinaisesti vaikuta. Analyyttisen mallin luonti vaatii päivityksistä huolimatta aina muutaman työskentelyvaiheen. Ratkaisemattomaksi tiedonsiirron ongelmaksi jäi eri teräsprofiilien tiedonsiirron virheet. Toisaalta teräsprofiilien määrä on pieni kaikista siirrettävistä elementeistä tyypillisessä betonielementtirakenteisessa kohteessa. Koska osien määrä on suhteellisen pieni, voidaan muutama teräsprofiili mallintaa toisaalta FEM-Designin puolella. Ongelman selvittäminen kuuluu rajapinnan jatkokehitykseen. Revitin analyyttisen mallin tarkistuksen työkaluja on myös syytä tutkia lisää, koska niiden hyödyntäminen jäi vähäiselle käytölle niiden heikon käytännöllisyyden takia. Jos niiden muokkaus ominaisuuksista tunnistetaan hyödyllisiä ominaisuuksia, voidaan analyyttistä mallia valmistella tarkemmaksi Revitin työtilassa. Toisaalta Revit Add-In työkalun toiminnallisuudet ovat jalostettuja Revitin valmiista toiminnallisuuksista ja niillä päästään haluttuun lopputulokseen riittävällä työmäärällä. Työssä huomattiin myös, että työskentely on suoraan osittain linkitettyä, kun käytetyillä elementeillä on luontihistoria FEM-Designissa. Uudestaan tuotetuilla siirtotiedostoilla voidaan päivittää laskentamallin

tiedot, ja pitää rakenneanalyysi ajan tasalla projektin edetessä. Ohjelmien välille voidaan luoda myös täysin linkitetty työskentelytila, jolloin mitoitettut rakenneosat voitaisiin tuoda takaisin Revit-ohjelmiston puolelle analyysin jälkeen.

Useat tiedonsiirron vaatimat toimenpiteet ennen FEM-Designiin siirtymistä olivat suhteellisen nopeita. Toimenpiteiden työmäärä vaikutti alkuun suurehkolta, mutta tietomallin luonnin päivityksillä ja prosessin kehittämisellä työmäärä pieneni huomattavasti. Revitin analyttisen mallin huomioinnilla ei ollut lopulta vaikutusta normaaliin rakennemallin luontiin, kun useimmat muutokset voidaan luoda valmiiksi rakennekirjastoon. Revitiin tarvitsee päivittää laajemmin rakennekerrosten materiaalit, rakennekerroksien tyyppiluonti ja asettaa valmiiksi analyttisen mallin asetukset. Näin saadaan aina valmiiksi projektiin valmiudet sille, että tiedonsiirron työkalulla voidaan suorittaa tiedonsiirrot tehokkaasti.

Suurin työmäärä FEM-Designissa tulee olemaan tukien ja kuormitusten lisääminen malliin, kun voidaan olettaa yksinkertaisemmissa tilanteissa rakennemallin vaativan vain vähän muokkauksia FEM-Designissa. Lisäksi laskentamallin tarkistamiseen ja korjailuun on hyvä käyttää aikaa tulosten luotettavuuden varmistamiseksi. FEM-Designin hyödyntäminen yksinkertaisemmillä kohteilla on todennäköisesti vielä tehokkaampaa, koska ongelmakohdat vähenevät ja yksinkertaistuvat. FEM-Designissa on rakenneanalyysin lisäksi paljon hyödynnettävää. Ohjelmassa on paljon työkaluja, kuten teräs-, puu- ja betoniosien mitoitusominaisuuksia, joiden käytön soveltaminen voisi tehostaa suunnittelutyötä ja helpottaa suunnittelutyötä. Näiden käyttöönotto vaatii kuitenkin suuren työmäärän.

Autodesk Revit 2019 ja Strusoft FEM-Design kommunikoivat hyvin yhdessä käytetyllä rajapinnan tiedolla. Rajapinnan työkalu toimii tiedonsiirrossa riittävän tehokkaasti ja soveltuu siihen vaaditulla tarkkuudella. Rajapinnan kautta voidaan jatkossa siirtää todennäköisesti paremmin tietoa, kun sitä ehditään soveltaa erilaisissa kohteissa, ja sille huomataan tarpeellisia toiminnallisuuksia. Case tutkimuksen perusteella perustuskuormat ovat järkevästi laskettavissa siirretyllä rakennemallilla, kun sille suoritetaan pienet korjaukset.

6. YHTEENVETO

Tietomallintamisen kehittämiseksi ja tietomallien tehokkaammalle hyödyntämiselle on tulevaisuudessa selkeä tarve. Tietomallien avulla voidaan kommunikoida tehokkaasti muiden osapuolien kanssa. Nykyiset mallintamisohjelmat tarjoavat mahdollisuuden kehittää yritysten käyttöön monenlaisia työkaluja. Monet mallintamisen työtehtävät voisi tehdä kehittyneillä tavoilla, mutta usein työkalujen kehittämiseksi ei jää tarpeeksi aikaa, jolloin niiden toimivuuksiin jää paljon parannettavaa. Suunnittelun laskentaohjelmat vaativat yhtä lailla paljon kehitystyötä, koska ohjelmat vaativat lähes poikkeuksetta sisäisiä kehityshankkeita. Ohjelmilla on mahdollista toimia paljon laajemmin, mutta ohjelmiin perehtyminen ja niiden kehittäminen yritysten toimintaympäristöön vaatii suuren työpanostuksen.

Tutkimuksen perusteella tiedonhallinnalla ja tietosisällön kontrolloinnilla on suuri merkitys tietomallin hyödyntämismahdollisuuksissa. Mallintaessa on tärkeää huomioida mallintamisen oikeellisuus, jotta ristiriidoilta ja suurilta ongelmilta voidaan välttyä. Rakennemallista tietosisältö on hallittavissa koko projektin ajan, kun alusta asti kiinnitetään huomiota rakennusosien laatuun ja tietosisältöön. Kun tietomallin tietosisältöä osataan hallita niin, ettei mallinnuksesta aiheutuvia ongelmia eikä tiedonsiirron ongelmia esiinny, voidaan rakenneanalyysissa keskittyä rakennesuunnittelun ongelmiin. Tutkimuksen avulla havaittiin jo joitain tyyppivirheitä, jotka ovat vältettävistä mallinnuksen laadunvarmistuksella. Ohjelmien välinen kommunikointi toimii osittain linkitettyinä tiedon siirtyessä Revitistä FEM-Designiin, mutta kommunikoinnista on mahdollista muodostaa kaksisuuntainen.

Autodesk Revit 2019 ja Strusoft FEM-Design voivat kommunikoida hyvin yhdessä käytetyllä rajapinnan tiedolla. Kun rakennemallin tietosisältöön kiinnitetään jatkuvasti huomiota, voidaan rajapintaa hyödyntää tehokkaasti ja varmistua sen toiminnasta. Rakenneanalyysin suorittamiseen vaadittava malli voidaan valmistaa Revitin ohjelmiston työkaluilla riittävän tarkaksi ja oikeelliseksi. Tarkalla mallilla säästetään aikaa rakennemallin tiedonsiirron suorittamisessa. Tietomallin hyödyntämiselle rakenneanalyysiin saatiin luotua alustava toimiva prosessi, jonka ympärille on hyvä laajentaa toiminnallisuuksia. Prosessin luonnin yhteydessä saatiin kehitettyä tietomallinnuksen tietosisältöä riittävälle tasolle. Prosessin avulla saadaan siirrettyä tarpeelliset rakennusosat riittäväillä tiedoilla FEM-Designiin.

FEM-laskenta puolelle jää paljon kehitysmahdollisuuksia, jotta ohjelmasta saadaan hyödynnettyä suurempaa osaa sen tarjoamista mahdollisuuksista. Tutkimuksen lopetushetkellä tietosisällön hyödyntäminen ei ole rajoitteena erilaisille laskentaprosesseille. Luonnollinen suunta jatkotutkimukselle on perehtyä tarkasti FEM-laskentaohjelmiston analyysivaihtoehtoihin sekä mahdollisuuksiin, ja kehittää tarpeelliseksi nähtäville laskentavaihtoehdoille omat prosessinsa. Suunnittelun tehostaminen parametrinen mallinnuksen avulla on myös yksi rakennusalan kehityssuunta, jonka hyödyntämistä on syytä harkita.

LÄHTEET

[1] Autodesk. Revit 2019 help manual. Saatavissa (viitattu 2.2.2019):

<https://help.autodesk.com/view/RVT/2019/ENU/>

[2] Cook R. (1995). Finite Element Modeling for Stress Analysis. United states John wiley & Sons, Inc.

[3] Strusoft AB. FEM Design User Manual. Saatavissa (viitattu 3.4.2019):

<https://wiki.fem-design.strusoft.com/xwiki/wiki/femdesignwiki/view/Manuals/User%20Manual/>

[4] Strusoft AB. FEM Design Applied Theory and Design. Saatavissa (viitattu 6.4.2019):

<https://wiki.fem-design.strusoft.com/xwiki/wiki/femdesignwiki/view/Manuals/Theory%20Manual/>

[5] Rombach, G. A. (2004). Finite element desing of concrete stuctures. Lontoo: Thomas Tel-ford Publishing

[6] Alsuhairee Noor, Hedström Martin. (2013). The effect of uncertainties in the design of complex structural systems by using FEM. Lund university, Division of Structural engineering

[7] Yleiset tietomallivaatimukset YTV2012, Osa 5 Rakennesuunnittelu, COBIM-hankkeen osapuolet, Saatavissa (viitattu 20.2.2019): <https://buildingsmart.fi/yleiset-tietomallivaatimukset-ytv>

[8] Strusoft: StruSoft StruXML Revit Add-In New Features guide. Saatavissa (viitattu 6.4.2019):

<https://strusoft.com/news/strusoft-struxml-revit-add-in-1-1-011-is-released>

[9] Strusoft: StruSoft StruXML Revit Add-In Manual. Saatavissa (viitattu 10.4.2019):

http://static.strusoft.com/FEM-Design/tools/Revit/Revit_StruXML_Add_In_1.1.011_manual.pdf

[10] RIL 229-1-2013 Rakennesuunnittelun asiakirjaohje (tekstiosa). (2013). Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry

[11] RT 10-11128 (2013). Rakennesuunnittelun tehtäväluettelo RAK12. Rakennustieto Oy

- [12] Kallio, Sini (2017). Rakentamisen Määrätietojen Hallinta Tietomallihankkeessa, Rakennustekniikka - Civil Engineering, and Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta - Faculty of Computing and Electrical Engineering, Tampereen teknillinen yliopisto
- [13] Hietanen, Jiri (2005). Tietomallit Ja Rakennusten Suunnittelu: Filosofinen Selvitys Tieto- Ja Viestintätekniikan Mahdollisuuksista. Helsinki: Rakennustieto
- [14] Yleiset tietomallivaatimukset YTV2012, Osa 6 Laadunvarmistus, COBIM-hankkeen osapuolet. Saatavissa (viitattu 13.7.2019): <https://buildingsmart.fi/yleiset-tietomallivaatimukset-ytv>
- [15] Yleiset tietomallivaatimukset YTV2012, Osa 1 Yleinen osuus, COBIM-hankkeen osapuolet. Saatavissa (viitattu 13.7.2019): <https://buildingsmart.fi/yleiset-tietomallivaatimukset-ytv>
- [16] Kiviniemi Markku. (2017). Tietomallit ylläpitoon -esiselvitys. Saatavissa (viitattu 28.7.2019): <https://buildingsmart.fi/testi/>
- [17] Tanska, T. & Österlund, T. (2014). Algoritmit puurakenteissa: menetelmät, mahdollisuudet ja tuotanto, B 32, 1st ed. DigiWoodLab, Oulun yliopisto, Arkkitehtuurin tiedekunta
- [18] Eastman, Chuck; Teicholz, Paul; Sacks, Rafael; Liston, Kathleen (2008). BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors 2nd ed., John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey. p.648

LIITE A: TIEDONSIIRRON PROSESSI

